



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Sede Regional del Norte
Recinto Universitario Augusto C. Sandino

Trabajo monográfico para optar al Título de Ingeniero Agroindustrial

“Evaluación de la producción de biogás a partir de suero lácteo a escala de laboratorio”

Autores:

Br. Juan Carlos Arranz Ramírez
Br. Javier Alberto Zamora Calero
Br. Donald Samuel Zelaya Lanuza

Tutor:

MSc. Sandra Lorena Blandón Navarro

Estelí, Octubre 2014

Dedicatoria

A Dios por darnos la sabiduría y las fuerzas para seguir adelante y no desmayar ante los problemas que se presentaron y no desfallecer en el intento.

A nuestros padres, quienes nos motivaron para poder llegar a la culminación de nuestros estudios, ya que han estado presentes para apoyarnos moral, psicológica y económicamente.

A nuestra tutora por el tiempo, paciencia y dedicación para orientarnos en el trabajo realizado.

Agradecimientos

A Dios por darnos abundantes bendiciones, permitiéndonos alcanzar una meta más en nuestra vida.

A nuestros padres por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales, confiando en nosotros y entusiasmándonos para terminar.

A nuestra tutora MSc. Sandra Lorena Blandón Navarro, por su paciencia, amistad y dedicación de su valioso tiempo para guiarnos en las etapas de la investigación.

De igual manera retribuimos nuestro agradecimiento a todas las personas que de diferentes formas fueron de ayuda en la realización de este trabajo monográfico y no son mencionados.

RESUMEN

Esta investigación tuvo la finalidad de determinar la producción de biogás con suero lácteo. Inicialmente se caracterizaron las materias primas (estiércol y suero), basándose en identificar qué tipo de suero era ideal para la producción de metano, por lo tanto, durante la investigación se determinó que ambos tipos de suero (dulce y ácido) cumplen con las condiciones necesarias, ya que la operación de neutralización permite regular el pH. Una vez que fueron caracterizadas las materias primas se realizaron seis tratamientos, con 3 formulaciones en diferentes concentraciones (10%, 15% y 20% de sólidos totales) a base de suero, y como testigo las mismas formulaciones, cambiando solamente el suero por agua, utilizando en los seis tratamientos excretas de ganado bovino, realizando observación y colecta de datos por un periodo de 20 días, midiendo el nivel de producción de gas.

Posteriormente, se procedió a analizar los datos realizando pruebas estadísticas que respaldaron la selección de la formulación que presento mejores resultados suero y excretas al 20 % de sólidos totales Esta formulación fue utilizada al cargar el biodigestor que produjo un volumen de 31.1 L de gas durante los 31 días que se mantuvo en funcionamiento. Con este gas se realizó una prueba de tiempo de transferencia de calor entre el gas butano y el biogás, donde se obtuvo que el gas comercial (butano) presentó un menor tiempo de transferencia de calor que el biogás, alcanzando 100 °C en 3:22 min y 5:13 min, respectivamente. Para determinar si la tecnología generada es mejor en relación a la ya existente (agua + excretas) se realizó un presupuesto parcial donde se obtuvieron como resultados los costos de producción por litros de mezclas que son de \$0.48 en el caso de suero y de \$0.29 para el agua sin embargo los rendimientos para el biogás utilizando suero fueron de 12797.78 L mensual y utilizando agua 2466.67 L mensual, lo que demuestra que es más económico el uso de suero, por lo antes expuesto concluimos que si es posible generar biogás utilizando suero lácteo obteniendo así mejores rendimientos que utilizando agua.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	ANTECEDENTES	2
III.	JUSTIFICACIÓN	5
IV.	OBJETIVOS	6
4.1	Objetivo General	6
4.2	Objetivos Específicos	6
V.	MARCO TEORICO.....	7
5.1	Generalidades del suero lácteo.....	7
5.1.1	Tipos de suero.....	7
5.1.2	Aspectos medioambientales del suero	9
5.2	Proceso de biodigestión.....	10
5.2.1	Digestión Aeróbica	10
5.2.2	Digestión Anaeróbica.....	10
5.2.3	Biodigestores.....	17
5.3	Presupuesto parcial	19
5.3.1	Datos requeridos para el análisis de presupuesto parcial	19
VI.	HIPOTESIS DE INVESTIGACIÓN	21
VII.	METODOLOGIA.....	21
7.1	Ubicación del estudio	21
7.2	Tipo de investigación	22
7.3	Diseño experimental	22
7.4	Variables a medir	24
7.5	Fases de la Investigación.....	24
7.5.1	Pruebas para caracterizar la materia prima	25

7.5.2	Determinación de la mezcla con mayor rendimiento de producción de gas.	29
7.5.3	Validación del biogás a través de la determinación del tiempo de transferencia de calor.....	32
7.5.4	Determinación del presupuesto parcial.....	35
VIII.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
8.1	Pruebas para caracterizar la materia prima.....	36
8.2	Determinación de la mezcla con mayor rendimiento de producción de biogás.....	37
8.3	Validación del biogás a través de la determinación del tiempo de transferencia de calor	47
8.4	Determinación del presupuesto parcial de la producción de biogás con suero lácteo.....	52
IX.	CONCLUSIONES.....	56
X.	RECOMENDACIONES	58
XI.	BIBLIOGRAFÍA	59
XII.	ANEXOS	
XIII.	SIGLARIO	

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica.....	13
Figura 2: Medición del pH al suero dulce	25
Figura 3: Medición de densidad al suero dulce	25
Figura 4: Medición de densidad al suero ácido	26
Figura 5: Medición de pH al suero ácido	26
Figura 6: Medición de °Brix al suero ácido	26
Figura 7: Recolección de excretas	27
Figura 8: Pesado de placa vacía	27
Figura 9: Pesado de 20 g de excretas	27
Figura 10: Muestras en el horno	28
Figura 11: Enfriado de las muestras previo al pesaje	28
Figura 12: Pesado de muestra enfriada	28
Figura 13: Llenado de jeringas	30
Figura 14: Identificación de jeringas	31
Figura 15: Ordenado de jeringas	31
Figura 16: Armado de biodigestor	32
Figura 17: Llenado de biodigestor	32
Figura 18: Etapa de biodigestión	33
Figura 19: Determinación del volumen de gas en el neumático	33
Figura 20: Prueba de agua hirviendo con gas butano	34
Figura 21: Prueba de agua hirviendo con biogás	34
Figura 22: Separación de medias de la producción de gas por sólidos totales y disolvente, prueba de Duncan al 5%.....	38
Figura 23: Comportamiento del tratamiento de 10% de ST y agua	41

Figura 24: Comportamiento del tratamiento de 10% de ST y suero	42
Figura 25: Comportamiento del tratamiento de 15% de ST y agua	43
Figura 26: Comportamiento del tratamiento de 15% de ST y suero	43
Figura 27: Comportamiento del tratamiento de 20% de ST y agua	46
Figura 28: Comportamiento del tratamiento de 20% de ST y suero	45
Figura 29: Resumen de regresiones cubica por tratamiento	46
Figura 30: Promedio de los tiempos y las temperaturas alcanzadas por el biogás y gas butano	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Contenido de nutrientes de suero dulce por 100 g.....	8
Tabla 2: Contenido de nutrientes de suero ácido por 100 g.....	8
Tabla 3: Datos promedios sobre el contenido de ST de diversos residuos	15
Tabla 4: Diseño experimental para la selección de la mezcla con mayor rendimiento en cuanto a tiempo y volumen de producción de gas	23
Tabla 5: Diseño experimental para medición del tiempo de transferencia de calor	23
Tabla 6: Porcentaje de sólidos totales de la excreta de ganado bovino	36
Tabla 7: Análisis de varianza	39
Tabla 8: Cuadro de análisis de la variancia (SC Tipo III)	39
Tabla 9: Prueba de Duncan de porcentaje de sólidos totales	40
Tabla 10: Prueba de Duncan disolvente	40
Tabla 11: Prueba de Duncan de la interacción de porcentaje de ST y disolvente	41
Tabla 12: Resultado de prueba de agua hirviendo utilizando biogás	48
Tabla 13: Resultado de prueba de agua hirviendo utilizando gas butano	48
Tabla 14: Estimación de carga diaria y producción de biogás en un biodigestor con capacidad de 1000 L	51
Tabla 15: Costos de producción de biogás con agua	53
Tabla 16: Costos de producción de biogás con suero	53
Tabla 17: Presupuesto parcial	54

I. INTRODUCCIÓN

Denicia & Ramires Castillo, 2009 afirman que el suero lácteo o suero de leche está conformado por todos aquellos componentes de la leche que no se logran integrar en la coagulación de la caseína, este efluente contiene la mayor parte de compuestos hidrosolubles (lactosa, proteína, grasa de la leche). Se estima que a partir de 10 litros de leche de vaca se puede producir de 1 a 2 kg de queso y un promedio de 8 a 9 kg de suero, el que representa cerca del 90% del volumen de la leche.

Esto indica el enorme desperdicio de nutrientes que se origina en la fabricación de queso, los cuales pueden causar daños perjudiciales al ambiente si es arrojado sin un tratamiento previo, ya que las proteínas y la lactosa son los principales agentes contaminantes que permiten la reproducción de microorganismos produciendo cambios significativos para su tratamiento biológico porque tienen una elevada demanda biológica de oxígeno (DBO). (Denicia & Ramires Castillo, 2009).

La producción en Nicaragua de este efluente según Vicepresidencia, Gobierno de Nicaragua, se considera que es de 22.3 millones de galones para el año 2011, cifra poco alentadora ya que es muy elevada en relación a los usos que se le da a este residuo, vertiéndose gran parte de estos a los sistemas de aguas residuales o manto terrestre. Esto ha generado la necesidad de diversificar la manera de aprovechamiento del suero, entre ellos se ha encontrado las posibilidades de obtener energía.

Por lo anteriormente expuesto el desarrollo del presente estudio tiene como objetivo evaluar la producción de biogás a partir de suero lácteo, a escala de laboratorio, en el municipio de Estelí. La investigación incluye el desarrollo de un conjunto de experimentos, los cuales fueron realizados en el laboratorio de Agroindustria de la Universidad Nacional de Ingeniería, Recinto Universitario Augusto C. Sandino.

II. ANTECEDENTES

Para efectos de esta investigación se realizó un proceso de revisión bibliográfica. Se encontraron antecedentes de trabajos como el desarrollado por Kavacik & Topaloglu, 2008. Dicha investigación consistió en la producción de biogás a partir de co-digestión de una mezcla de suero de queso y estiércol lechero. En el estudio se evaluaron tres formulaciones diferentes, en relación a los sólidos totales y temperatura (10% ST a 34 °C, 8% ST a 34 °C y 8% ST a 25 °C), con tiempos de retención hidráulica de 5, 10 y 20 días.

Kavacik & Topaloglu, 2008 realizaron los experimentos en un reactor de acero inoxidable, con forma cilíndrica, con un volumen total de 26.6 litros y un volumen de trabajo de 20 litros; el equipo era calentado por un termostato que circulaba agua caliente, la temperatura de la mezcla se controló con un termómetro metálico situado en la mitad de la profundidad, ajustado a 25 o 34 °C según fue el caso; la agitación fue proporcionada por un motor agitador a 0.3 Hz, el cilindro estaba recubierto por fibra de vidrio para evitar la pérdida de calor y la recolección del biogás se realizó a través de una bolsa Tedlar. La medición de la concentración del contenido de metano se hizo mediante una cromatografía de gases, usando helio como gas portador.

Los resultados obtenidos por los autores señalan que la mejor formulación fue la de 8% de sólidos totales a 34 °C, en un tiempo de retención igual a 5 días, con un contenido de metano del 60%, la reducción máxima de la demanda química de oxígeno (DQO) se produjo en esta misma formulación y fue de un 54% (Kavacik & Topaloglu, 2008).

Los autores Kavacik & Topaloglu, resaltan en su conclusión que el método más apropiado para el tratamiento del suero es la digestión anaeróbica, esto debido al alto contenido orgánico y a la biodegradabilidad del residuo; pudiéndose aplicar en

instalaciones ya existentes, y que junto a los residuos agrícolas locales, es sostenible y ambientalmente un método atractivo. (Kavacik & Topaloglu, 2008).

Comino, Rosso, & Riggio, 2009, llevaron a cabo un estudio sobre el desarrollo de un digestor a escala piloto para la producción de biogas a base de suero lácteo y estiércol de vaca. El experimento consistió en fabricar primeramente un digestor cilíndrico de acero inoxidable con una altura de 94 cm y un diámetro de 40.3 cm. El volumen de llenado fue de 102.8 L, y el material estaba compuesto por 32 L de estiércol de vaca, 32 L de suero de leche y 16 L de inóculo.

Una vez realizada la primera etapa de la investigación se comprobó la producción de gas a los días 2, 7, 9, 15 y 16 mediante la utilización de un gasómetro, esta fase experimental tuvo una duración total de 55 días y los autores concluyeron que esta tecnología puede resolver dos problemas complejos. Por un lado está la producción de metano, por el otro, permite un manejo eficiente de algunos residuos ya que según pruebas realizadas antes de iniciar y finalizar la fase experimental demuestran que este proceso disminuye considerablemente los niveles de DQO de este efluente (Comino, Rosso, & Riggio, 2009).

Magaña Ramirez , Rubrio, Jimenez Islas, & Matínez García, 2011, realizaron un estudio, que consistía en una digestión anaeróbica para la obtención de biogás a partir de residuos lácteos de crema, queso y suero de lácteo en combinación con estiércol de cabra, esto mediante tres formulaciones diferentes, manteniendo la misma cantidad de desechos y variando solamente la cantidad de excreta y suero lácteo.

En dicho estudio se realizó una pre-digestión del estiércol de cabra y así utilizarlo como inóculo de bacterias metanogénicas. Los ensayos se llevaron a cabo por lotes a escala de laboratorio utilizando un reactor de acero inoxidable con un volumen de 10 litros cada uno, provistos de un mezclador manual, puerto de alimentación para los residuos de carga, válvula de seguridad y un sistema de

control de la temperatura. El biodigestor también está provisto de un termómetro bimetalico, manómetro de Bourdon. El reactor se operó a 35 °C, con un pH de 7.0. El porcentaje de metano en el biogás se determinó por medio de cromatografía de gases. Los resultados mostraron que la mayor concentración de metano fue de 82%, obtenida con la formulación número tres que se componía de 4 litros de suero, 200 g de desperdicio de queso, 200 g de desperdicio de crema, 200 g de inoculante y 1400 g de estiércol de cabra (Magaña Ramirez , Rubrio, Jimenez Islas, & Matínez García, 2011).

Teniendo en consideración estas investigaciones se planteó la ejecución del presente trabajo monográfico, el cual tomó en cuenta las características propias del suero de leche y las tecnologías disponibles en el entorno para su aprovechamiento en la producción de biogás.

III. JUSTIFICACIÓN

El suero de leche es un subproducto de la industria láctea siendo sus principales componentes la lactosa, proteínas y sales minerales. Este subproducto tiene una alta fuerza orgánica, presentando una demanda química de oxígeno (DQO) en el rango de 60,000 – 80,000 mg/L, que a menudo causa problemas de eliminación para las manufactureras de queso (Liao & Lo, 1988).

Esta demanda química de oxígeno refleja que es un líquido altamente biodegradable, por lo que la digestión anaeróbica es una alternativa viable en el tratamiento de sueros, ofreciendo ventajas energéticas al producir biogás, y no consumir energía en procesos de aireación utilizados en los tratamientos tradicionales aeróbicos como los lodos activados.

Es por esto que se planteó la presente investigación, que consistió en evaluar la producción de biogás a partir de suero lácteo, de manera que se pueda contribuir a consolidar una nueva alternativa de aprovechamiento de este efluente, proponiendo la sustitución de los materiales comúnmente utilizados (agua y melaza) por suero lácteo.

A partir de los resultados del presente trabajo monográfico es posible inferir que el sector lácteo sería beneficiado de forma directa, lográndose contar con una alternativa de aprovechamiento que podría ser aplicada en los procesos donde se requiera energía calorífica, o bien en la generación de energía eléctrica con biogás. Del mismo modo, la ejecución de este trabajo tiene repercusiones en beneficio del medio ambiente, ya que se estaría reduciendo el contenido orgánico del suero y se evitaría la descarga de este efluente en el manto terrestre o en las cañerías de aguas negras.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

- Evaluar la producción de biogás a partir de suero lácteo, a escala de laboratorio.

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia prima (suero lácteo y excretas) a utilizar en la producción de biogás.
- Determinar la mezcla de suero con excreta de ganado bovino que presente mayor rendimiento de producción de gas.
- Validar el biogás producido con suero lácteo a través de la medición del tiempo de transferencia de calor.
- Determinar el presupuesto parcial con beneficio marginal y costo marginal para la implementación de la tecnología generada.

V. MARCO TEORICO

En este capítulo se abordan, los aspectos teóricos que sustentan esta investigación, incluyendo las generalidades del suero lácteo, el proceso de biodigestión, los principales factores a considerar para una buena producción de gas, así mismo las principales calificaciones de biodigestores y los factores económicos a considerar para la implementación de este tipo de tecnología.

5.1 Generalidades del suero lácteo

El suero lácteo es un líquido translúcido amarillento obtenido de la leche después de la precipitación de la caseína el cual contiene principalmente lactosa, proteínas como sustancias de importante valor nutritivo, minerales, vitaminas y grasa. La lactosa es el principal componente nutritivo (4.5%), proteína (0.8%), y lípidos. Existen varios tipos de suero dependiendo principalmente de la eliminación de la caseína, el primero denominado dulce, está basado en la coagulación por la renina a pH 6.5; el segundo llamado ácido resulta del proceso de fermentación o adición de ácidos orgánicos o ácidos minerales para coagular la caseína. (Aguado, 2006)

En cualquiera de los dos tipos de lacto suero obtenidos, se estima que por cada kg de queso se producen de 8.5 a 9.0 kg de lacto suero, esto representa cerca del 80% - 90% del volumen de la leche y contiene aproximadamente el 55% de sus nutrientes.

5.1.1 Tipos de suero

El suero de leche, según su acidez, se divide en dos tipos: suero dulce con pH de 6.3 – 6.6 y suero ácido con pH menor a 5.0. Esta es la diferencia principal entre estos dos tipos de suero, aparte del medio acidificante. (García Garibay, Revah M., & Gómez Ruíz, 2004).

El suero dulce es el producto lácteo obtenido durante la elaboración del queso, la caseína o productos similares, mediante la separación de la cuajada, después de la coagulación de la leche y/o los productos derivados de la leche. La coagulación se obtiene mediante la acción de, principalmente, enzimas del tipo del cuajo. (Instituto Ecuatoriano de Normalización - INEN, 2012)

Según el Codex alimentarius (CODEX STAN 289-1995) se define al suero ácido como el producto lácteo líquido obtenido durante la elaboración del queso, la caseína o productos similares, mediante la separación de la cuajada tras la coagulación de la leche y/o los productos derivados de la leche. La coagulación se produce, principalmente, por acidificación. A continuación se presentan los contenidos nutricionales del suero dulce y ácido, en las tablas 1 y 2.

Tabla 1.: Contenido de nutrientes de suero dulce (por 100 g)

Agua (%)	93.12	Rivoflavina (mg)	0.16
Energía (Kcal)	27	Niacina mg	0.07
Proteína (g)	0.85	Ác. Grasos mono-insaturados (g)	0.10
Gasa total (g)	0.36	Ác. Grasos poli-insaturados (g)	0.01
Carbohidratos (g)	5.14	Ác. Grasos saturados (g)	0.23
Fibra (g)	0.00	Colesterol (mg)	2
Ceniza (mg)	0.53	Potasio (mg)	161
Calcio (mg)	47	Sodio (mg)	54
Fosforo (mg)	47	Zinc (mg)	0.13
Hierro (mg)	0.06	Magnesio (mg)	8
Tiamina (mg)	0.04	Vit. B12 (mcg)	0.28

Fuente: (Menchú & Méndez, 2007)

Tabla 2.: Contenido de nutrientes de suero ácido (por 100 g)

Agua (%)	93.42	Rivoflavina (mg)	0.14
Energía (Kcal)	24	Niacina mg	0.08
Proteína (g)	0.76	Ác. Grasos mono-insaturados (g)	0.03

Gasa total (g)	0.09	Ác. Grasos poli-insaturados (g)	0.00
Carbohidratos (g)	5.12	Ác. Grasos saturados (g)	0.06
Fibra (g)	0.00	Colesterol (mg)	1
Ceniza (mg)	0.61	Potasio (mg)	143
Calcio (mg)	103	Sodio (mg)	48
Fosforo (mg)	78	Zinc (mg)	0.43
Hierro (mg)	0.08	Magnesio (mg)	10
Tiamina (mg)	0.04	Vit. B12 (mcg)	0.04

Fuente: (Menchú & Méndez, 2007)

5.1.2 Aspectos medioambientales del suero

Las estadísticas indican que una importante porción del suero es descartada como efluente, generando de esta manera un serio problema ambiental.

Debido a las grandes cantidades de queso que son producidas a nivel mundial, el lacto suero ha generado un problema de contaminación ambiental asociados por su contenido en lactosa, grasa, proteínas, minerales, vitaminas responsables de los elevados valores de DBO y DQO presentes en el mismo.

Este gran contenido de nutrientes del suero produce aproximadamente 3,5 Kg de demanda biológica de oxígeno (DBO) y 6,8 Kg de demanda química de oxígeno (DQO) por cada 100 Kg de lacto suero producido, valores de 5,0 Kg de DBO y 10 Kg de DQO se obtienen al tener aumento en las perdidas de finos por defectos de coagulación siendo la lactosa la responsable de un 70 a 80 % de los valores obtenidos; la transformación de 100,000 litros de leche / día en quesos genera una contaminación equivalente a una población de 55,000 a 65,000 habitantes. (Valencia Denicia & Ramírez Castillo, 2009).

5.2 Proceso de biodigestión

La población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de los residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Esto permite establecer bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos. (Varnero Moreno, 2011).

5.2.1 Digestión Aeróbica

La digestión aeróbica consiste en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular.

La principal ventaja del proceso aeróbico es la simplificación en las operaciones de disposición de los lodos comparada con la relativa complejidad operativa del proceso de digestión anaeróbica. El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la autooxidación de la materia celular.

La digestión aeróbica presenta diversas ventajas dentro de las cuales destacan la facilidad de operación del sistema, bajo capital de inversión comparada con la digestión anaeróbica, no genera olores molestos, reduce la cantidad de coliformes fecales y por lo tanto, de organismos patógenos, produce un sobrenadante clarificado con una baja DBO, con pocos sólidos y poco fósforo. (Varnero Moreno, 2011).

5.2.2 Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de

otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores. Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. (Varnero Moreno, 2011).

En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico.

En este tipo de digestión, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. (Varnero Moreno, 2011).

De manera que los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo. (Varnero Moreno, 2011).

5.2.2.1 Productos de la digestión anaeróbica

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, son el biogás y un bioabono que consiste en un efluente estabilizado.

- **Biogás**

Se llama biogás a la mezcla constituida por metano CH_4 en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. (Hilbert, 2010).

La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso, cuando el contenido de metano es superior al 45% el gas es inflamable.

- **Fundamentos de la fermentación metanogénica**

Para comprender el proceso de producción de biogás es necesario tener una idea general sobre el proceso microbiológico, así como el diseño y funcionamiento de los denominados biodigestores. (Hilbert, 2010).

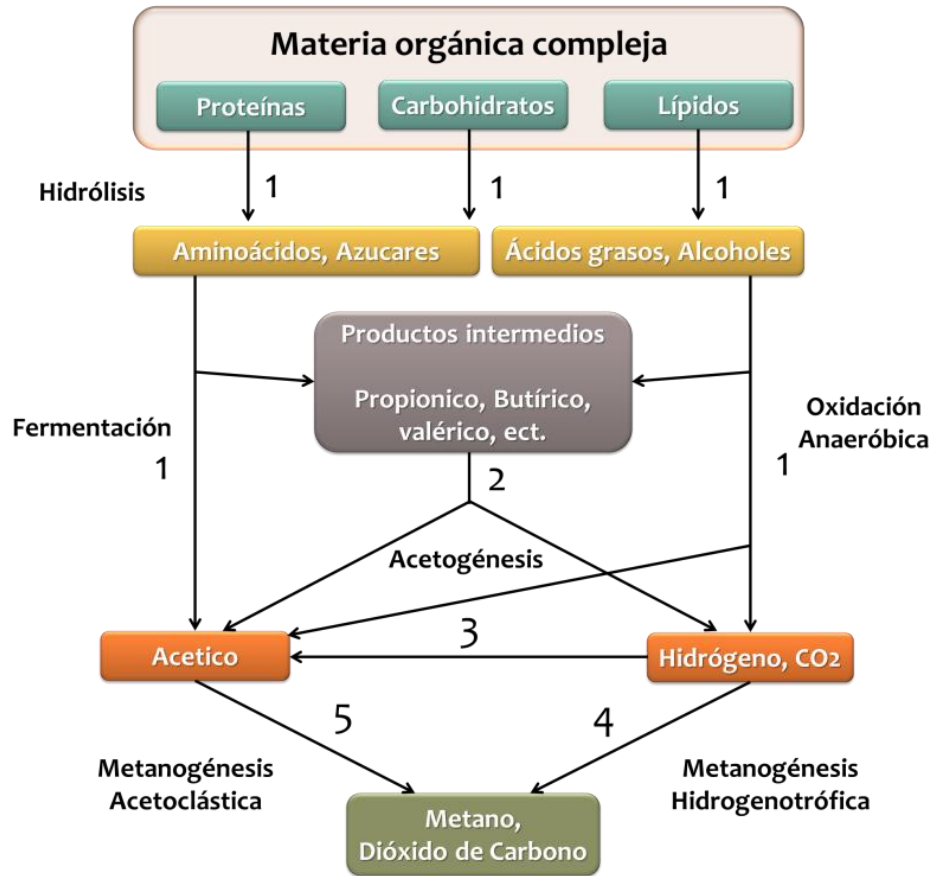
Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas (Varnero Moreno, 2011):

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizados por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos ácidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias ácidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos ácidogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

En la figura 1 se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados. Los números indican la población bacteriana responsable del proceso:

- 1: bacterias fermentativas
- 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno;
- 3: bacterias homoacetogénicas;
- 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas;
- 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 1: Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica



Fuente: (Varnero Moreno, 2011)

- **Materias primas útiles para la producción de biogás**

Las diversas materias primas que se pueden utilizar en la fermentación metanogénica, pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal (malezas, rastrojos de cosechas, paja, forraje en mal estado), animal (estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos, residuos de pescados), agroindustrial (salvado de

arroz, orujos, melazas, residuos de semillas.), forestal (hojas, vástagos, ramas y cortezas), doméstico (heces, orina, basura). (Varnero Moreno, 2011).

Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico.

- **Factores determinantes en el proceso metanogénico.**

Evaluar algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico es de gran importancia, debido a que los microorganismos participantes en este proceso son muy susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. El proceso de metalogénesis es una etapa fundamental en la producción de metano. Entre los factores determinantes se pueden citar:

a). Temperatura: Los procesos anaeróbicos están fuertemente ligados a la temperatura; de esta depende la velocidad de reacción, así mismo el crecimiento de microorganismos involucrados. Por lo tanto a medida que la temperatura aumenta, también aumenta con ella la velocidad de crecimiento y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden provocar la desestabilización del proceso, razón por la cual se busca garantizar una temperatura homogénea en el digestor, para lo que es necesario un sistema adecuado de agitación. Según estudios se ha indicado que la temperatura para la producción de metano ronda entre los 20 °C y los 40 °C. (Varnero Moreno, 2011).

b). Niveles de sólidos totales: Toda la materia orgánica se compone de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). El porcentaje de estos sólidos contenidos en la mezcla que se carga al digestor es un factor importante a

considerar para asegurar que el proceso se efectuó de manera satisfactoria. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato está altamente ligada a la medida del aumento en el contenido de sólidos y de esta manera puede afectarse la producción de gas.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga de digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 25% de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40% a 60% de sólidos totales.

Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima para dar la proporción adecuada de sólidos totales, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima fresca (tabla 2).

Tabla 3: Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos.

Materias	% Sólidos totales
Residuos animales	
Bovinos	13.4 – 56.2
Porcinos	15.0 – 49.0
Aves	26.0 – 92.0
Caprinos	83.0 – 92.0
Ovejas	32.0 – 45.0
Conejos	34.7 – 90.8
Equinos	19.0 – 42.9
Excretas humanas	17.0
Residuos vegetales	
Hojas secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja de trigo	88.0 – 80.0
Leguminosas (paja)	60.0 – 80.0

Tubérculos (hojas)	10.0 – 20.0
Hortalizas (hojas)	10.0 – 15.0
Aserrín	74.80 – 80.0

Fuente: (Varnero Moreno, 2011)

La fórmula para determinar el porcentaje de sólidos totales de la carga es la siguiente:

$$\% ST \text{ Carga diluida} = \frac{1 \text{ kg excreta fresca} * \% ST \text{ Excreta fresca}}{1 \text{ kg excreta fresca} + \text{Agua agregada}}$$

De esta fórmula se puede despejar el agua que se necesita agregar para una determinada proporción de sólidos totales.

c). Rangos de pH: El proceso anaeróbico es afectado en gran manera debido a pequeños cambios en los niveles de pH. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica.

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. Para los acidogénicos el óptimo es entre 5.5 y 6.5, para los metanogénicos 7.8 y 8.2.

Para que el proceso se desarrolle de manera satisfactoria, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0; Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menos cualidades energéticas. Debido a que la metalogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. (Varnero Moreno, 2011)

- **Factores que afectan la producción de biogás**

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Entre los más importantes a tenerse en cuenta se desarrollarán los siguientes: el tipo de sustrato (nutrientes disponibles); la temperatura del sustrato; la carga volumétrica; el tiempo de retención hidráulico; el nivel de acidez (pH); la relación Carbono/Nitrógeno; la concentración del sustrato; el agregado de inoculantes; el grado de mezclado; y la presencia de compuestos inhibidores del proceso (ácidos grasos volátiles, hidrogeno, nitrógeno amoniacal, sulfatos y sulfuros, cationes y metales pesados. (Hilbert, 2010)

5.2.3 Biodigestores

El reactor o biodigestor corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construyen en la actualidad son cilíndricos.

El suelo del reactor está inclinado, para que la arena, el material inorgánico sedimentable y la fracción pesada del afluente puedan ser extraídos del tanque. Los biodigestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es impedir que escapen olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales desde una piscina cubierta de HDPE, concreto, hasta acero inoxidable. (Varnero Moreno, 2011)

- **Clasificación de los biodigestor de acuerdo a la frecuencia de cargado**

- a). **Biodigestores batch o discontinuos:** Este tipo de reactor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir gas combustible. Normalmente consisten en tanques herméticos

con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante donde se almacena el biogás.

Este tipo es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente; y generalmente se usa una batería de biodigestores que se cargan en diferentes tiempos para que la producción de gas sea constante.

De igual manera es ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas. La principal desventaja que presenta es que no hay manera de producir más gas del que ya se ha generado. (Torres Guillén & Arteaga Chávez, 2009).

- b). **Biodigestores semicontinuos:** Este tipo de biodigestor es alimentado diariamente con una carga relativamente pequeña en comparación al contenido total. Esta carga es depositada en la cámara de carga, e igualmente se debe extraer de la cámara de descarga un volumen igual del efluente líquido para así mantener el volumen constante.

Generalmente producen biogás de manera permanente, gracias al suministro constante de nuevos nutrientes para las comunidades de bacterias. Es el tipo de reactores más usados en las zonas rurales, cuando se trata de sistemas de uso doméstico. (Torres Guillén & Arteaga Chávez, 2009).

- c). **Biodigestores continuos:** Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control. Por lo tanto este tipo de plantas son más bien instalaciones tipo

industriales, donde se genera una gran cantidad de biogás el que a su vez se aprovecha en aplicaciones de la industria. (Torres Guillén & Arteaga Chávez, 2009)

5.3 Presupuesto parcial

El presupuesto parcial también denominado método de presupuesto de adaptación, es una herramienta analítica, que permite calcular el efecto de un cambio parcial en el plan existente. En este método se plantean explícitamente cuales son las perdidas y cuáles son las ganancias que se producen como consecuencia de la modificación planteada. (Constantino & Scheggia, 2010).

El método de presupuesto parcial tiene como objetivo determinar la conveniencia de sustituir una actividad y/o un insumo variando el nivel de producción. El análisis es útil en cada fase del proceso de investigación, extensión, adopción. En el primer caso, puede ayudarle al investigador a concentrar su atención en aspectos problemáticos de las tecnologías que esté desarrollando, en las cuales es necesario reducir costos y aumentar retornos. En segundo, puede ayudarle al extensionista a desarrollar recomendaciones acertadas con un alto potencial de adopción. Finalmente, puede ayudarle a mejorar su proceso de toma de decisiones. (Horton, 1982)

5.3.1 Datos requeridos para el análisis de presupuesto parcial

Para la realización de un análisis de presupuesto parcial es necesario considerar:

- **Unidad de análisis:** es lo que se pretende analizar mediante la prueba comparativa.
- **Precio de la unidad de análisis:** este precio es equivalente a los costos variables.
- **Costos totales (CT):** incluyen los costos de todos los insumos equivalente a la sumatoria de los costos fijos (CF) más los costos variables (CV) por ende matemáticamente se expresa como $CT=CF+CV$.

- **Precio de la unidad de análisis producida:** es el precio que presentan el resultado de la unidad de análisis.
- **Ingreso Total:** este corresponde al valor de la unidad de análisis.
- **Ingreso neto (IN):** es la cantidad de dinero que queda cuando los costos totales (CT) se restan del ingreso total (IT) expresado de la siguiente manera $IN=IT-CT$.
- **Cambio del ingreso neto (ΔIN):** cuando se evalúa una unidad de análisis se pretende determinar si al comparar una con otra cual presenta mejores resultados, por lo tanto, se evalúa con el incremento en el ingreso neto, siendo la diferencia entre cambio del ingreso total (ΔIT) y el cambio del costo total (ΔCT) expresado matemáticamente como $\Delta IN=\Delta IT-\Delta CT$.
- **Tasa de retorno (TR):** es una medida del incremento en el ingreso generado por cada unidad adicional de costos expresado como $TR= \Delta IN/\Delta CT$

VI. HIPOTESIS DE INVESTIGACIÓN

Es posible producir biogás de la mezcla de excretas de ganado bovino y suero lácteo.

VII. METODOLOGIA

La investigación fue desarrollada en dos etapas, en la primera etapa se llevó a cabo una caracterización de la materia prima (suero y excretas de ganado bovino) y posteriormente la determinación de la mezcla de suero con excretas que presentara el mayor rendimiento de producción de gas, para esto se usaron jeringas de 50 mL como unidades experimentales. Producto de los resultados obtenidos de la primera etapa, se desarrolló la segunda etapa que constaba de validar el biogás producido en un biodigestor tipo batch a escala, a través la medición del tiempo de transferencia de calor. Finalmente se determinó el costo marginal y beneficio marginal haciendo un análisis presupuestario parcial del uso de biogás producido con suero en comparación al biogás producido con agua. En este acápite se describe la metodología que se empleó para la ejecución de esta investigación.

7.1 Ubicación del estudio

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de agroindustria de la Universidad Nacional de Ingeniería, Recinto Universitario Augusto C. Sandino, Sede Regional del Norte, ubicado en la salida sur-oeste de la ciudad de Estelí, Nicaragua, Se escogió este laboratorio, porque se cuenta con los equipos necesarios y específicos para la obtención de datos confiables, en las actividades planteadas para el desarrollo del estudio.

7.2 Tipo de investigación

La investigación es de tipo experimental, teniendo como finalidad evaluar la producción de biogás mediante la utilización de suero lácteo, monitoreando las variables de volumen de gas producido y tiempo de producción de gas.

7.3 Diseño experimental

En este acápite se presenta la forma en que se trabajaron los múltiples experimentos necesarios para el desarrollo de la investigación. Dichos experimentos fueron la determinación de la mezcla con mayor rendimiento de producción de biogás y la medición del tiempo de transferencia de calor.

Para ambos experimentos se utilizó un diseño experimental comparativo. En este tipo de diseño, los tratamientos se comparan por sus efectos medios sobre una variable respuesta con el objeto principal de determinar cuál de ellos es mejor en algún sentido. El propósito de este tipo de experimentos es proveer información necesaria para tomar decisiones administrativas satisfactorias. (Pacheco, 2011)

A continuación se presenta en tablas el detalle de los diseños experimentales para cada experimento mencionado anteriormente:

Tabla 4: Diseño experimental para la selección de la mezcla con mayor rendimiento en cuanto a tiempo y volumen de producción de biogás.

Etapa	Variables		Número de tratamiento	Repeticiones	Formulación
	independiente	Dependiente			
1	Porcentaje de sólidos totales	Volumen de gas producido	1	30	Suero + Excretas 10% Sólidos Totales
			2	30	Suero + Excretas 15% Sólidos Totales
	Tiempo de producción de gas		3	30	Suero + Excretas 10% Sólidos Totales
			4	30	Agua + Excretas 10% Sólidos Totales

	Disolvente		5	30	Agua + Excretas 15% Sólidos Totales
			6	30	Agua + Excretas 10% Sólidos Totales

Para el experimento de la tabla 4 se ha considerado lo que expone Varnero Moreno (2011), el cual sugiere que en biodigestores semicontinuos el porcentaje de sólidos totales para un buen funcionamiento oscila entre del 8% al 25%, por lo que se eligieron tres porcentajes que estuvieran entre estos valores y son: 10%, 15% y 20%. Se utilizó agua porque es el disolvente más común, debido principalmente a la disponibilidad.

Como unidades experimentales se utilizaron jeringas de 50 mL, 30 por cada tratamiento, las que en total fueron 180 jeringas. Se ocupó solamente 10 mL de mezcla en cada jeringa, sellando con silicón los espacios donde podría haber entrada o salida de gas garantizando la hermeticidad en las jeringas.

Se identificó cada una de las jeringas según la formulación, T1 para el 10% de sólidos totales, T2 para el 15% en sólidos totales y T3 para el 20% de sólido totales, seguido una letra S o A para identificar si la mezcla era con suero o agua, y por ultimo una numeración del 1 al 30 para cada jeringa; por ejemplo para una muestra de suero al 10% su identificación era la siguiente: T1-S-01.

Tabla 5: Diseño experimental para la medición del tiempo de transferencia de calor.

Etapas	Variables		Número de tratamiento	Repeticiones	Gas utilizado
	independiente	Dependiente			
2	Tipo de gas utilizado	Tiempo de transferencia de calor	1	2	Biogás
			2	2	Gas butano

A partir de los resultados obtenidos en la primera etapa, fue escogida la formulación que presentó el mayor volumen de gas. En este sentido se procedió a realizar la medición del tiempo de transferencia de calor, se realizó una prueba

comparativa entre el biogás producido y el gas comercial butano, en donde fue necesario adaptar un quemador que funcionara con el biogás y utilizando una cocina común para el gas butano. A estos dos tratamientos se le realizaron dos repeticiones por cada uno, donde se pretende obtener el resultado de cuál de los dos gases genera un menor tiempo de transferencia de calor.

Para el análisis se evaluó con métodos estadísticos descriptivos e inferenciales como ANDEVA y regresión en el programa estadístico InfoStat.

7.4 Variables a medir

Durante el proceso de los experimentos mencionados en el acápite anterior las variables medidas según el orden de experimento fueron:

- **Volumen de gas producido:** Este dato se obtuvo a través de la medición del desplazamiento del émbolo por acción del gas, el cual fue monitoreado y registrado cada 24 horas.
- **Producción de gas:** Se midió si el gas que se generaba era combustible, al dejar de producir gas el biodigestor, se hizo el cálculo de cuanto gas aproximadamente pudo haberse recolectado en el neumático.
- **Tiempo de transferencia de calor:** Esta variable se determinó mediante la prueba de agua hirviendo (TWB), utilizando para esto una estufa convencional y una modificada para biogás, un termómetro y un cronometro para medir el aumento de la temperatura en relación al tiempo, hasta alcanzar los 100 °C.

7.5 Fases de la Investigación

A continuación se presenta una descripción de las fases que fueron desarrolladas para la evaluación de la producción de biogás a partir de suero lácteo.

7.5.1 Pruebas para caracterizar la materia prima

Inicialmente se hicieron pruebas al suero, evaluando su densidad, el pH y grados Brix. El suero fue recolectado en Lácteos Losa, ubicado en el barrio Oscar Gámez, de la Fabrica Drew State, 1 cuadra al este y 2 cuerdas al sur. Se recolectaron 600 mL de suero dulce, esta cantidad se dividió en dos muestras de 300 mL, una de estas muestras se dejó en reposo por 24 horas para lograr que se hiciera un suero ácido según su pH, y a la otra muestra se le hicieron las pruebas anteriormente mencionadas, el mismo día que se recolectó. Ver figuras 2 a la 6



Figura 2: Medición de pH al suero dulce

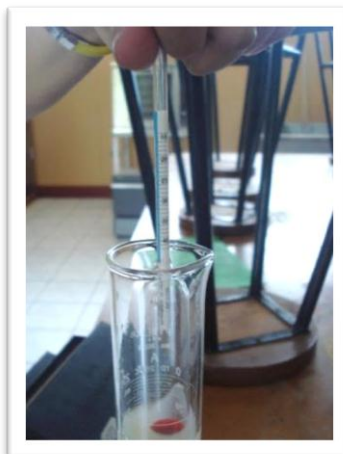


Figura 3: Medición de densidad al suero dulce



Figura 4: Medición de densidad al suero ácido



Figura 5: Medición de pH al suero ácido

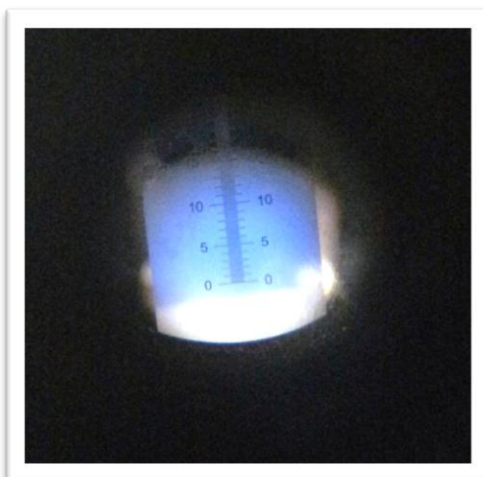


Figura 6: Medición de °Brix al suero ácido

El día 13 de Enero de 2014, se realizó la visita a la finca del Señor Tano Torres, para recolectar las muestras de excretas de ganado bovino (figura 7), dicha finca está ubicada en la comunidad La Tunosa, aproximadamente a 800 metros de la entrada principal del Recinto Augusto C. Sandino.

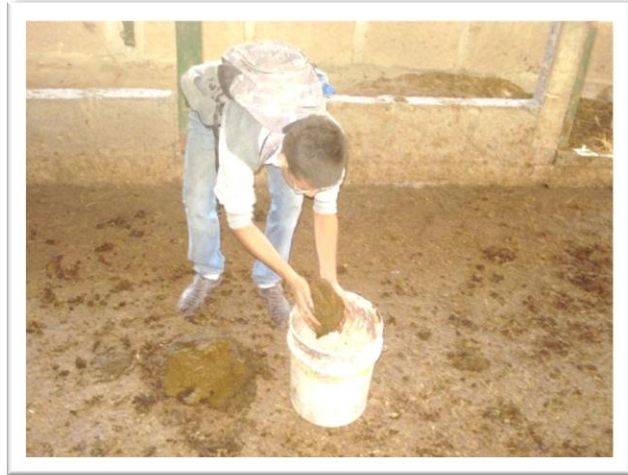


Figura 7: Recolección de excreta

La excreta que se recolectó fue de la más fresca y de la misma boñiga; la cantidad total tomada fue de 200 g, los que fueron llevados al laboratorio de la universidad para realizar el cálculo de sólidos totales.

Para dicho cálculo, primero se tomaron 5 muestras de 20 g de excreta cada una, colocando los 20 g en placas de metal, identificadas individualmente del 1 al 5, se anotó su peso individual y luego se pesaron los 20 g de excreta a colocar en cada una de las placas, ver figuras 8 y 9.



Figura 8: Pesado de placa vacía



Figura 9: Pesado de 20 g de excreta

Posteriormente al pesaje, se procedió a colocar las cinco muestras de excreta en el horno por un tiempo de 3 horas a una temperatura de 105 °C. Ver figura 10.



Figura 10: Muestras en el horno

Transcurrido el tiempo que las muestras estuvieron en el horno se prepararon las bolsas con cierre, se enumeraron (figura 11) se colocó dentro de cada bolsa un trozo de papel de aluminio para evitar que el calor de la placa derritiera la bolsa, además se introdujo bolsitas de gel de sílice en cada una de las bolsas con cierre para que las muestras no ganaran humedad en el tiempo que se dejaron enfriar, este tiempo fue de 15 minutos, y luego se procedió a pesar cada muestra, ver figura 12.



Figura 11: Enfriado de las muestras previo al pesaje



Figura 12: Pesado de muestra enfriada

7.5.2 Determinación de la mezcla con mayor rendimiento de producción de gas.

El 15 de enero se comenzó la determinación de la mezcla con mayor rendimiento de producción de gas. Para este proceso se utilizaron jeringas de 50 mL, y se trabajaron con tres formulaciones de suero, cada una diferenciada por el porcentaje de sólidos totales. Se trabajó como testigo las mismas formulaciones, a diferencia de que se sustituyó el suero por agua purificada.

Primero se recolectó la excreta de ganado, en la misma finca, garantizando que la necesaria sea de una sola boñiga. Se hizo la recolección del suero en lácteos Losa, y se procedió a hacer las 6 formulaciones diferentes. Como se ha dicho antes, los porcentajes de sólidos trabajados fueron: 10%, 15% y 20% para cada formulación con suero y agua.

Para conocer la cantidad de suero a agregar a cada una de las formulaciones planteadas se trabajó con la fórmula propuesta por Varnero Moreno (2011):

$$\% ST \text{ Carga diluida} = \frac{1 \text{ kg excreta fresca} * \% ST \text{ Excreta fresca}}{1 \text{ kg excreta fresca} + \text{Suero/Agua agregada}}$$

En donde:

% ST Carga diluida: equivale a los tres porcentajes planteados 10%, 15% y 20%

% ST Excreta Fresca: fueron los calculados en la caracterización de materia prima

Ejemplo del cálculo que se hizo, considerando un porcentaje de sólidos totales de 10%

$$0.10 = \frac{1 * 0.47}{1 + \text{Suero/Agua agregada}}$$

Despejando Suero/Agua agregada la formula quedó de la siguiente manera:

$$0.10 + 0.10 \text{ suero/agua agregada} = 1 * 0.47$$

$$\text{Suero /Agua agregada} = \frac{0.47-0.10}{0.10} \rightarrow \text{Suero /Agua agregada} = \frac{0.37}{0.10}$$

$$\text{Suero /Agua agregada} = 3.47 \text{ Litros/ kg de excreta} \quad (10\% \text{ ST})$$

El mismo procedimiento se hizo para los otros porcentajes, cambiando solamente el valor de 10% por 15% y/o 20% los resultados fueron:

15%: 2.13 litros/ kg de excreta

20%: 1.35 litros/ kg de excreta

La siguiente actividad fue el llenado de las jeringas. En total se llenaron 180 jeringas, 30 por cada formulación con suero y 30 por cada formulación con agua. Se ocuparon solamente 10 mL de mezcla en cada jeringa, para el llenado se retiró el embolo y se tapó con el dedo la parte de succión, luego se colocó el embolo y se invirtió la posición de la jeringa de modo que la zona de succión quedara libre y se pudiera retirar todo el aire, posteriormente, se fue sellando con silicón los espacios donde podría haber entrada o salida de gas garantizando la hermeticidad de las pruebas. Ver figura 13



Figura 13: Llenado de jeringas

Una vez que se llenaron todas las jeringas se pasó a identificar cada una, con una numeración (ver figura 14), T1 para el 10% de sólidos totales, T2 para el 15% en sólidos totales y T3 para el 20% de sólido totales, luego iba una letra S o A para identificar si era con suero o agua, y por ultimo una numeración del 1 al 30 para

cada jeringa; por ejemplo para una muestra de suero al 10% su identificación era la siguiente: T1-S-01.



Figura 14: Identificación de jeringas

Las jeringas se colocaron en el mismo lugar todas, agrupadas por formulación y en orden por los números asignados a cada una ver figura 15, y su medición se hizo cada 24 horas (ver anexo 1: hoja de recogida de datos). El tiempo por el que se midió la producción de gas en las jeringas fue de 20 días.



Figura 15: Ordenado de jeringas

Luego de que pasaron los 20 días que se monitoreo el desplazamiento del embolo de cada jeringa por acción del gas que produjo la mezcla, la siguiente actividad fue analizar los datos mediante el uso del programa estadístico InfoStat.

7.5.3 Validación del biogás a través de la determinación del tiempo de transferencia de calor.

- **Generación de biogás utilizando suero lácteo**

Para la validación del biogás inicialmente se equiparon dos pichingas plásticas de 25 litros, para que ejercieran la función de un biodigestor tipo batch o discontinuo. Se le hizo una perforación al tapón para adaptar la tubería de ½ pulgada para lograr la salida del gas y así almacenarlo en un neumático de un vehículo, esto para lograr que el sistema de almacenamiento sea más grande ya que el gas producido diariamente no fue utilizado sino hasta que los niveles de producción se vieron disminuidos. Ver figura 16 y 17

Se trabajó con el mismo porcentaje de sólidos totales para cada uno de los reactores. Se llenó con mezcla el 75% del volumen total del reactor, luego se colocó el tapón y se selló con silicón alrededor para evitar el escape del gas o la entrada de oxígeno al reactor. Ver figura 18



Figura 16: Armado de biodigestor



Figura 17: Llenado de biodigestor

Los primeros días de biodigestión el gas que se produjo fue solamente dióxido de carbono (CO_2) el cual fue liberado para aumentar la concentración de metano en el gas que se produjo en los días posteriores.

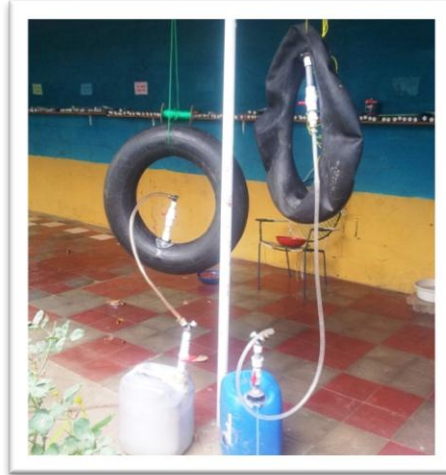


Figura 18: Etapa de biodigestión

El volumen de gas que se almacenó en el neumático, se calculó utilizando una probeta colocada en un soporte universal, y una pana con agua, tal como se ve en la figura 19. Para esta prueba se llenó la pana con agua y la probeta, invirtiendo la posición de la probeta, colocándola en el soporte universal a la altura del nivel del agua de la pana, de manera que el agua de la probeta no se derramara, luego se introdujo la manguera que estaba conectada al neumático, dentro de la probeta y se abrió la llave de pase del neumático, así el gas desplazaba toda el agua dentro de la probeta y de esta manera calcular un aproximado del volumen de gas.



Figura 19: Determinación del volumen de gas en el neumático

- **Validación del biogás generado mediante la medición del tiempo de transferencia de calor.**

Para la medición del tiempo de transferencia de calor del biogás, se utilizó la prueba del agua hirviendo, conocida como the water boiling test (WBT), usualmente destinada al diseño de estufas, no obstante en esta etapa se utilizó esta prueba para establecer el combustible con menor tiempo de transferencia de calor, partiendo de que al aplicar mayor calor se reduce el tiempo en llevar el agua a su punto de ebullición. El proceso consistió en colocar 200 mL de agua a temperatura ambiente en la estufa, en este caso particular se utilizaron dos estufas diferentes, ya que el sistema de funcionamiento del quemador de biogás es diferente a la de un quemador de gas butano, gas con que se comparó el tiempo de transferencia de calor del biogás. Se hicieron dos pruebas con cada tipo de gas, en momentos distintos.

Se hizo uso de un cronómetro para determinar el tiempo en que el agua tarda en llegar a los 100 °C, y un termómetro para verificar que la temperatura que se alcanzará fuese la deseada (100 °C), de esta forma se identificó el gas con menor tiempo de transferencia de calor. Ver figura 20 y 21. Es importante destacar que se utilizó la misma olla, las mismas condiciones ambientales y la misma cantidad de agua para cada gas (biogás y butano).



Figura 20: Prueba de agua hirviendo con gas butano



Figura 21: Prueba de agua hirviendo con biogás

Una vez que se obtuvieron los datos de las dos pruebas para cada gas, se procedió a evaluar la calidad del experimento, por medio del cálculo del coeficiente de variación.

7.5.4 Determinación del presupuesto parcial

Para la determinación del presupuesto parcial, se hizo una comparación del biogás producido utilizando agua y el biogás producido con suero, ambos con excretas de ganado bovino.

Para hacer el análisis de presupuesto parcial, consideramos un biodigestor semicontinuo, de capacidad de 1000 litros de mezcla, para ambos casos. Para estimar la producción de biogás para ambos casos se consideró la producción obtenida en el experimento con las jeringas, en las mezclas con 20% de sólidos totales.

Posteriormente se hizo cálculo de los costos, incluyendo solamente el costo del agua y suero, mano de obra y las excretas, para cada uno de los casos. Luego se estableció una tabla por un periodo de un mes, en la que se presentó la cantidad en litros de mezcla diaria, el precio por litro de esta carga, el rendimiento en cuanto a la producción de biogás, y el precio que se tendría de comercializarse el biogás. Con estos datos se calculó el costo de mezcla total, el ingreso total y el ingreso neto, con los valores obtenidos se determinó la tasa de retorno marginal, el costo marginal y el beneficio marginal.

VIII. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A través de la aplicación de la metodología antes descrita, se presentan los resultados de cada una de las etapas de la investigación.

8.1 Pruebas para caracterizar la materia prima

Al caracterizar la materia prima se determinó que el suero dulce posee un pH de 6.12 y una densidad de 1.022 gr/cm³ y un valor de 6 correspondiente a los grados Brix. Por su parte el suero ácido presentó un pH de 4.06 y la densidad de 1.022 gr/cm³, sin embargo el refractómetro no marcó ninguna lectura en lo referente a los grados brix, por lo que se deduce que su valor es de cero.

Según estas propiedades se determinó que el suero dulce es el más apto para la producción de biogás, ya que el pH que presenta es favorable para que la serie de reacciones que conforman la digestión anaeróbica se lleven a cabo de manera exitosa.

Por otra parte, el resultado del cálculo de sólidos totales realizado a las excretas se presenta en la tabla 6.

Tabla 6: Porcentaje de sólidos totales de la excreta de ganado bovino.

Muestra	Peso de la placa (g)	Cantidad inicial de excreta (g)	Peso final con placa (g)	Sólidos totales	Humedad	% sólidos totales
1	7.2	20	16.5	9.3	10.7	46.5
2	7.1	20	16.6	9.5	10.5	47.5
3	7.2	20	16.4	9.2	10.8	46
4	7.1	20	16.6	9.5	10.5	47.5
5	7.1	20	16.6	9.5	10.5	47.5
Promedio						47

El porcentaje promedio de la excreta con que se trabajó fue de 47 %, cantidad que se encuentra entre los valores presentado por (Varnero Moreno, 2011). Con este

porcentaje obtenido, se procede a realizar el cálculo de la cantidad de suero a mezclar, tal como se describe en las formulaciones propuestas a evaluar

8.2 Determinación de la mezcla con mayor rendimiento de producción de biogás

Para la determinación de la mezcla con mayor rendimiento de producción de biogás se tomaron dos criterios de evaluación una era niveles de producción y tiempo de producción esto fue respaldado con el procesamiento de los datos obtenidos de estas pruebas los cuales fueron analizados a través de InfoStat mediante un análisis de varianza, prueba de Duncan y un análisis de regresión no lineal cubica.

Para la comparación de todas las muestras se utilizó el análisis de varianza, y de esta manera ver si existe diferencias estadísticamente significativas, así también si hay o no interacción entre los tratamientos planteados; y así poder tener la certeza de que los datos analizados y crear condiciones favorables para la toma de decisiones.

Para demostrar estadísticamente la efectividad de los disolventes (llámese disolvente al suero y al agua) y porcentajes de sólidos totales utilizados fueron analizados atreves de la prueba de Duncan ya que los tamaños de las muestras son exactamente iguales y se pueden ordenar de una manera ascendente o descendente.

El análisis de regresión no lineal cubica, fue utilizado para poder comparar las variables tiempo y niveles de producción de todos los tratamientos, ya que este método es aplicable para poder explicar la interacción de las variables dependientes. Al realizar dichos análisis se identificó que la mezcla con mayor rendimiento para la producción de biogás es la mezcla que tiene 20% de sólidos totales y que usa como disolventes el suero lácteo.

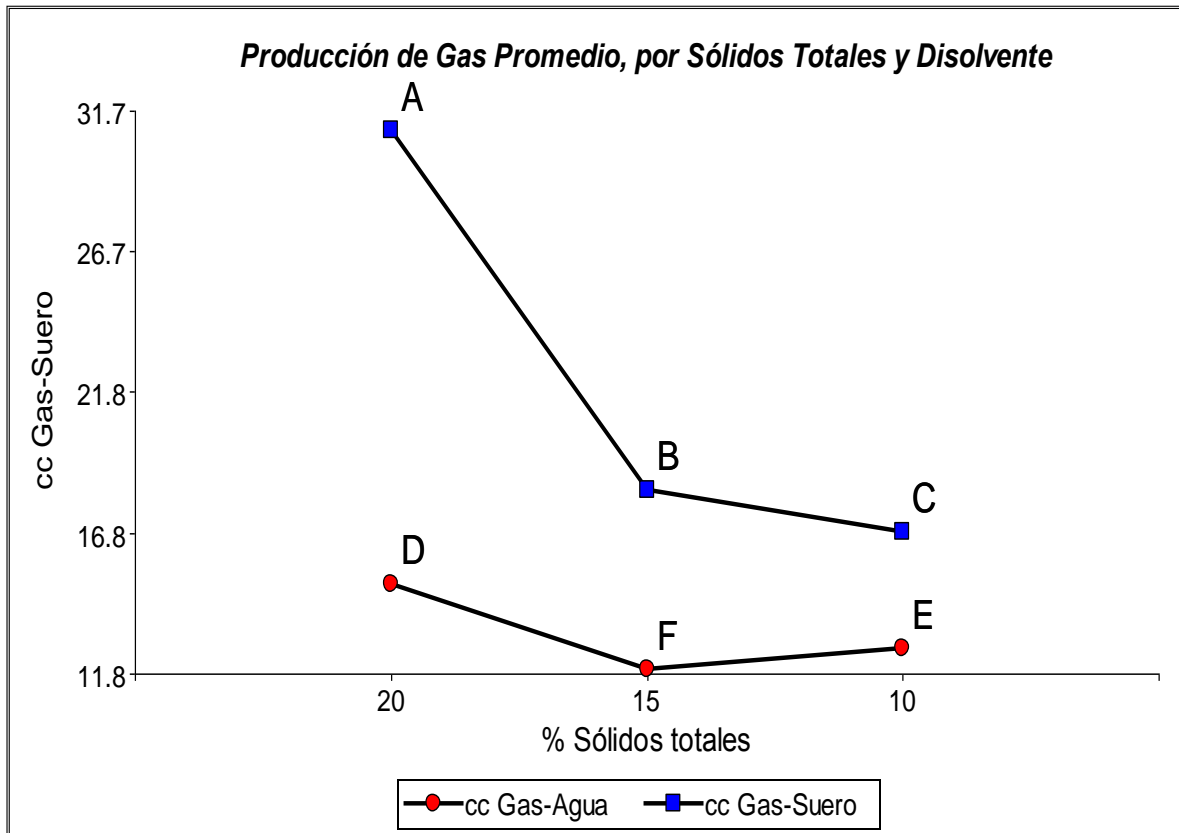


Figura 22: Separación de las medias de la producción de gas, por sólidos totales y disolvente, Prueba de Duncan al 5%.

En la figura 22 se puede observar de manera general, que existe una diferencia significativa entre cada uno de los tratamientos, tomando en cuenta los sólidos totales y el disolvente (agua y suero). Así mismo, el promedio más alto se alcanzó con la formulación al 20% de sólidos totales y suero (A), considerándose en esta investigación como la mejor formulación para la evaluación de la producción de biogás utilizando suero lácteo. En las tablas 6 y 7 se encuentra el resumen del análisis de varianza por cada una de las variables analizadas: volumen, porcentaje de sólidos totales, disolvente, día, y porcentaje de sólidos totales * disolvente.

Tabla 7: Análisis de varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Volumen	3600	0.72	0.72	26.48

Tabla 8: Cuadro de Análisis de la varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	203192.55	6	33865.43	1551.04	<0.0001	
% Sólidos totales	51475.11	2	25737.55	1178.79	<0.0001	
Disolvente	70030.80	1	70030.80	3207.43	<0.0001	
Día	57749.31	1	57749.31	2644.93	<0.0001	
% Sólidos Totales * Disolvente	23937.34	2	11968.67	548.17	<0.0001	0.69
Error	78449.42	3593	21.83			
Total	281641.97	3599				

Interpretando los resultados de las tablas anteriores (7 y 8) se puede observar que el coeficiente de variabilidad para la variable volumen (tabla 7) es de 26.48, atribuyendo este valor a la heterogeneidad de los datos analizados; sin embargo al examinar el p-valor, puede notarse que el valor para cada una de las variables (tabla 8) es menor a 0.05, indicando que existe diferencia significativa entre cada una de las variables analizadas, y que además existe interacción entre % de sólidos totales y Disolvente, esto demuestra que se puede determinar una mezcla con mayor rendimiento, ya que cada una es diferente a la otra.

Puede observarse en la tabla 9 el test de Duncan, para comprobar de igual forma si existen diferencias entre las formulaciones, comparando inicialmente al porcentaje de sólidos totales de cada uno de los tratamientos, y puede notarse que ninguna de las letras para cualquiera de los tres tratamientos son iguales, lo que indica nuevamente que no existe diferencia entre cada uno, y así se respalda que la formulación al 20 % de sólidos totales es aparentemente más efectiva que las otras dos formulaciones.

Tabla 9: Prueba de Duncan de porcentaje de sólidos totales

Test: Duncan Alfa= 0.05

Error: 21.8340 gl: 3593

% Sólidos totales	Medias	n	E.E.	
20	22.99	1200	0.13	A
15	15.17	1200	0.13	B
10	14.78	1200	0.13	C

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)***Tabla 10:** Prueba de Duncan disolvente

Test: Duncan Alfa= 0.05

Error: 21.8340 gl: 3593

Disolvente	Medias	n	E.E.	
Suero	22.06	1800	0.11	A
Agua	13.24	1800	0.11	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

En otra prueba de Duncan, tomando como variable a los dos tipos de disolventes con los que se trabajó (suero y agua) y en la tabla 10 se puede ver que las muestras en las que se utilizó suero difieren en el resultado del volumen producido, demostrando una vez más que el suero puede resultar útil como disolvente en la producción del biogás.

Además de estas dos pruebas de Duncan anteriores, se hizo una tercera prueba, esta vez tomando en cuenta el porcentaje de sólidos totales y disolventes de cada tratamiento, y se puede notar en la tabla 11, que los tratamientos son significativamente diferentes con respecto al porcentaje de sólidos totales y el disolvente. Y puede observarse que en la relación porcentaje de sólidos totales y disolvente, el tratamiento al 20% con suero fue que mejor eficacia tuvo, por lo que puede considerarse como la mejor.

Tabla 11: Prueba de Duncan de la Interacción del porcentaje de sólidos totales y Disolvente

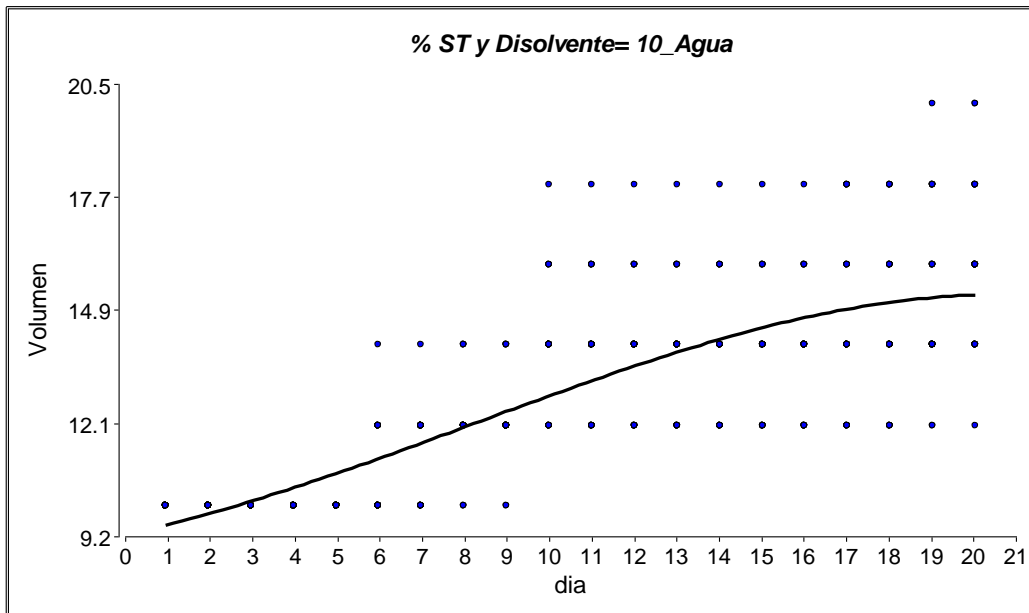
Test: Duncan Alfa= 0.05

Error: 21.8340 gl: 3593

% Sólidos totales	Disolvente	Medias	n	E.E.	
20	Suero	30.99	600	0.19	A
15	Suero	18.35	600	0.19	B
10	Suero	16.84	600	0.19	C
20	Agua	14.99	600	0.19	D
10	Agua	12.72	600	0.19	E
15	Agua	12.00	600	0.19	F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

- **Regresión no lineal, Cúbica**

**Figura 23:** Comportamiento de tratamiento de 10% de ST y Agua

De los datos obtenidos de la formulación al 15 % de sólidos totales con agua se realizó el gráfico del comportamiento del tratamiento de 10% de ST y Agua (ver figura 23) anterior en el cual se observa una variación del día 1 al 5, del cual el volumen del gas alcanzo un aumento hasta el día 20, con tendencia de aumento

posterior a los 20 de experimentación, con una producción de gas de aproximadamente 16 mL en 20 días con una producción real de 6 mL ya que inicialmente las muestras fueron llenadas con 10 mL de mezclas.

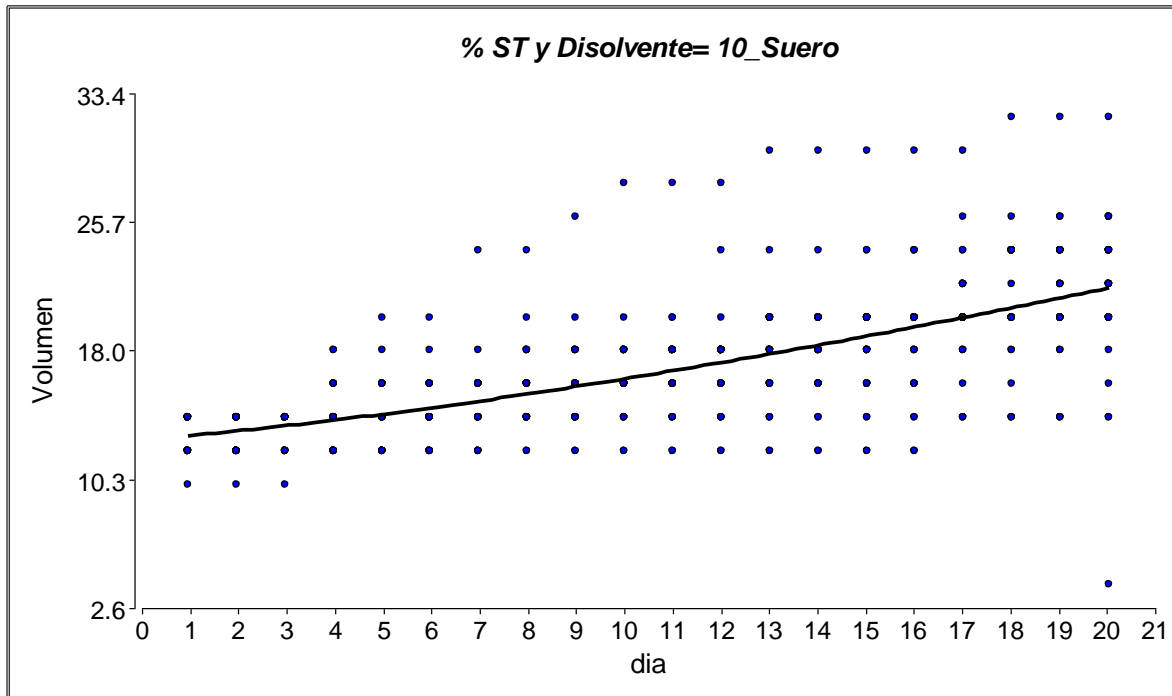


Figura 24: Comportamiento de tratamiento de 10% de ST y Suero

En la presente figura donde se utilizó una formulación a un 10 % de sólidos totales con suero, se puede observar que la producción de gas es constante en el transcurso de los 20 días, teniendo un notable crecimiento del día 5 al día 20 sin interrupciones, de igual manera es notable que tiene tendencia de seguir aumentando luego de los 20 días, acumulando un volumen real de 10 mL durante los 20 días de experimentación.

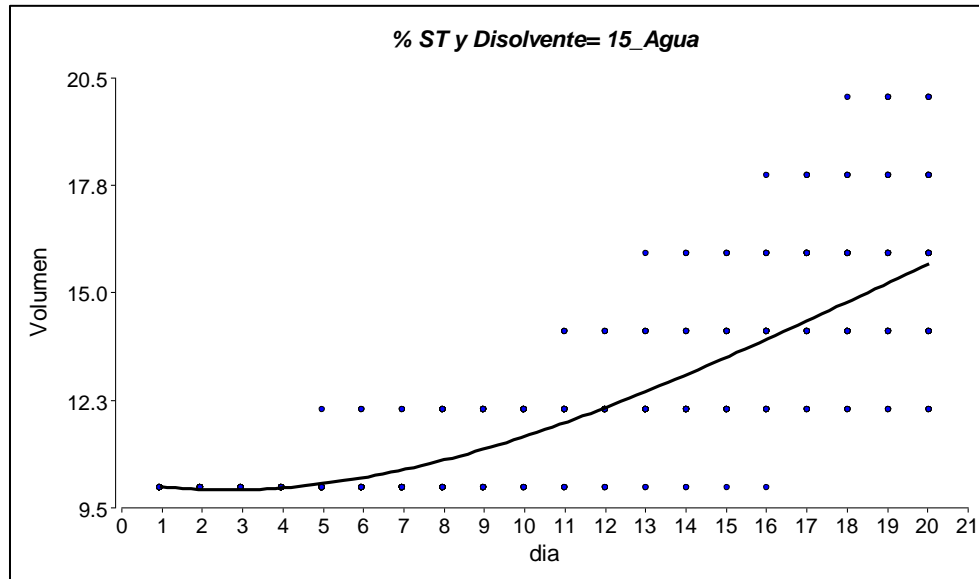


Figura 25: Comportamiento de tratamiento de 15% de ST y agua

De los datos obtenidos de la formulación al 15 % de sólidos totales con agua se realizó el gráfico anterior (ver figura 25) en el cual se observa una variación del día 1 al 5, del cual el volumen del gas alcanza un aumento hasta el día 20, con tendencia de aumento posterior a los 20 de experimentación, con una producción de gas de aproximadamente 16 mL con un volumen de producción real de 6 mL en 20 días.

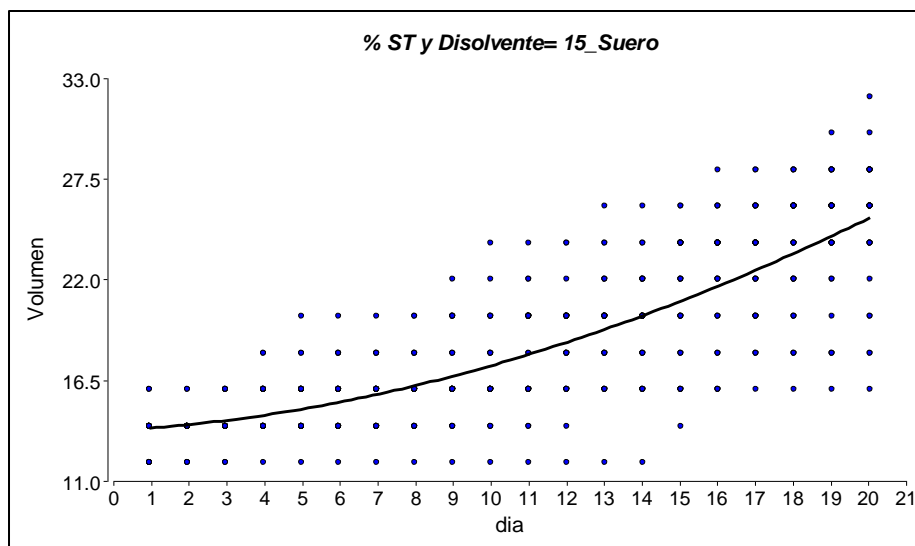


Figura 26: Comportamiento de tratamiento de 15% de ST y Suero

En la formulación al 15 % de sólidos totales con suero se obtuvo el gráfico del comportamiento del tratamiento de 15% de ST y Suero (ver figura 26), en el cual se observa baja producción de gas al inicio de la experimentación, sin embargo del tercer día hasta el día 20 el aumento fue progresivo y sin interrupciones de donde se puede observar que aun pasado los 20 días hay tendencia de que la producción de gas continúe, obteniendo una producción de gas en el transcurso de los 20 días de 26 mL con un nivel de producción real de 16 mL de gas.

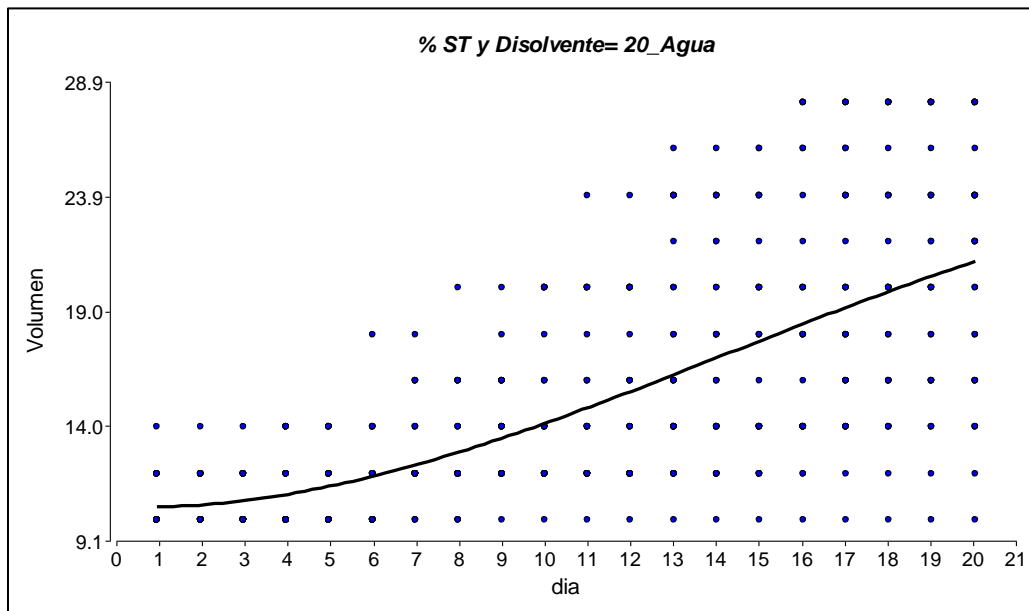


Figura 27: Comportamiento de tratamiento de 20% de ST y Agua

En el tratamiento anterior en el cual la formulación fue al 20 % de sólidos totales con agua, se observó que la producción de gas fue un poco inestable teniendo un aumento significativo del día 8 al 20 con una tendencia a no seguir produciendo gas en la misma escala posterior a los 20 días de experimentación, alcanzando una producción de 20 mL con un volumen real de 11 en los 20 días.

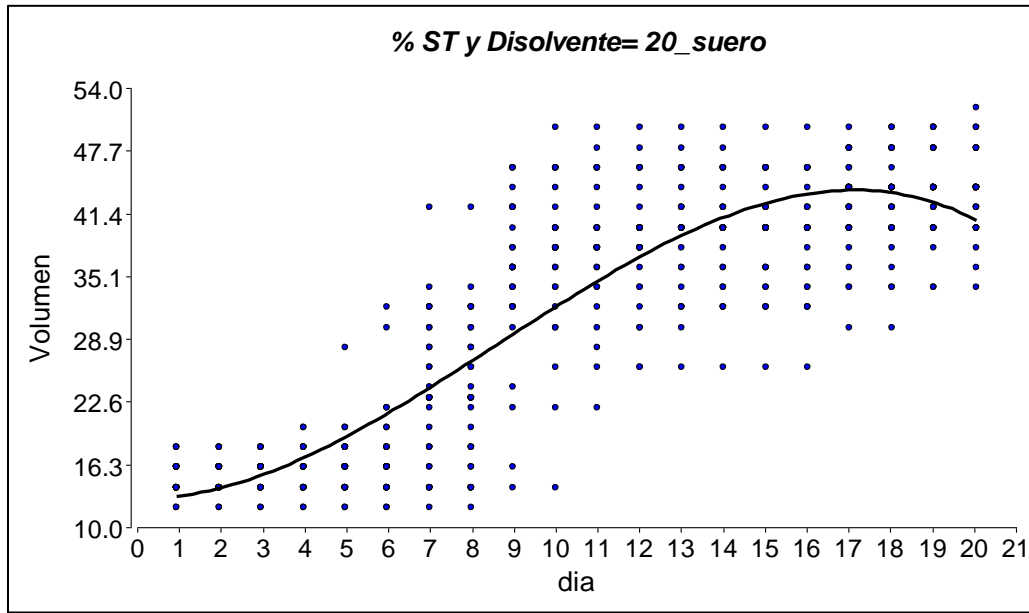


Figura 28: Comportamiento de tratamiento de 20% de ST y Suero

En la figura anterior utilizando la formulación al 20 % de sólidos totales con suero se observa que hay un aumento progresivo del día 1 al día 17 posterior a este día la producción de gas fue muy variable con una tendencia decreciente después de los 20 días de producción, alcanzando una acumulación de aproximadamente 43 mL en el periodo analizado el cual era de 20 días, pero con una producción real de 33 mL ya que se le resta el volumen inicial (10 mL de mezcla).

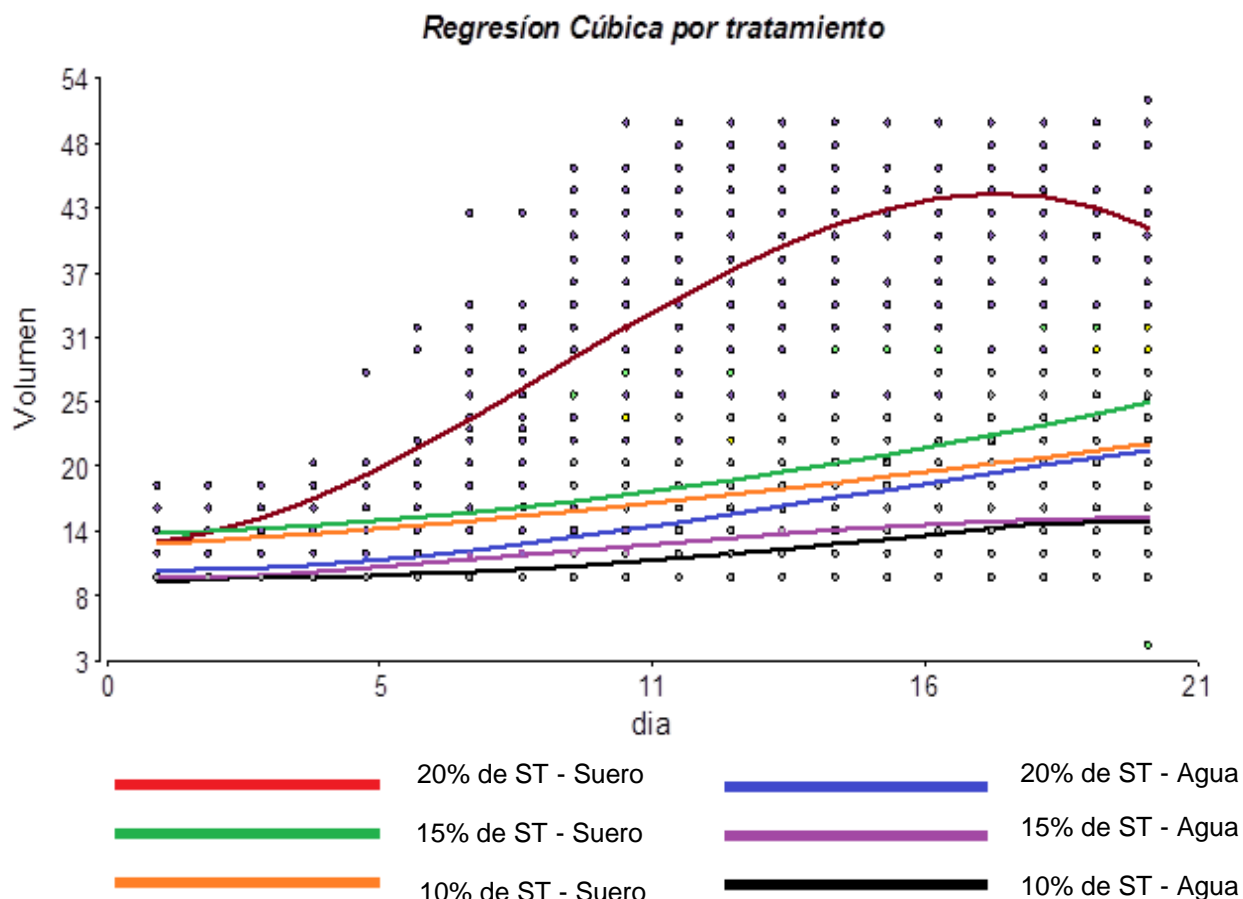


Figura 29: Resumen de regresiones cubicas por tratamiento

En esta figura se puede observar claramente los diferentes niveles de producción de gas segun el tipo de muestra, cabe recalcar que todos los tratamientos que utilizan suero son mas efectivo que los tratamientos que utilizan agua como disolventes, por lo tanto en el gráfico resumen demuestra que el uso de suero lacteo para la producción de biogas es mas eficiente ya que se logran alcanzar niveles de producción mas altos en menor tiempo tal es el caso de la mezcla con 20% de ST – Suero que en el periodo analizado de 20 días logro alcanzar un nivel de producción 43 mL (con una producción real de 33 mL) de gas en relación a los diferentes tratamientos. En el anexo 2 se presenta el análisis de la regresión no lineal, generado por InfoStat.

8.3 Validación del biogás a través de la determinación del tiempo de transferencia de calor

En relación a la generación de biogás, se trabajó con suero dulce, considerando el pH cercano a la neutralidad que este posee. Considerando que el pH es uno de los factores de mayor influencia para la generación de metano, se hizo una medición a la carga inicial, este pH resultó de 7 aproximadamente. Considerando la tendencia que tiene el suero a acidificarse, se hizo una segunda medición a las 24 horas del pH, tomando una muestra de 100 mL de la mezcla que estaba dentro de los reactores, se pudo notar que el pH en ambos reactores se encontraba en un valor de 4 aproximadamente.

Se procedió a elevar el pH de la muestra de 100 mL, utilizando para ello cal (Óxido de Calcio), y de esta manera establecer un indicador. Se obtuvo que para cada 100 mL de mezcla se debía de agregar 1.5 g de cal.

La cantidad de mezcla que se tenía en los reactores era de 18 y 14 litros, entonces para neutralizar el pH se utilizaron 27 y 21 g de cal respectivamente. Para adicionar la cal a la mezcla se disolvió cada cantidad en una pequeña cantidad de agua no clorada, y con ayuda de un embudo se introdujo en el interior de cada biodigestor; primero se colocó el embudo en el tubo de salida sin abrir la llave de paso, luego se llenó el embudo con la cal diluida en agua, una vez que se colocó la cantidad necesaria de cal diluida en el embudo se abrió la llave de paso y cuando toda la cal ingreso al sistema se cerró, y se procedió a agitar para que lograr una mezcla homogénea, se dejó en reposo un momento y se midió el pH, valor que se elevó a 7.

Es válido mencionar que para lograr producir biogás se hicieron varios intentos, ya que en algunas ocasiones el suero recogido contenía residuos de cloro y las vacas donde se recogían las excretas acababan de ser desparasitadas

Después de 24 horas se hizo otra medición y el valor del pH encontrado fue entre 6 y 7, por lo cual no se utilizó cal para estabilizarlo. Se hicieron 5 mediciones al pH después de puesto en funcionamiento, con un intervalo de tiempo de 24 horas cada una, y el valor que se obtuvo en las mediciones posteriores a la neutralización fue siempre entre 6 y 7. La cantidad obtenida, por el cálculo del volumen de gas que se almacena en el neumático fue de 31.123 L.

Tras la realización de la prueba de agua hirviendo (WBT), se obtuvieron los siguientes valores de medición presentados en las tablas 12 y 13.

Tabla 12: Resultado de la prueba de agua hirviendo utilizando biogás

T°	Primera prueba	Segunda prueba
26	00:00	00:00
45	01:49	01:51
62	02:05	02:09
70	02:29	02:33
82	03:14	03:17
85	03:28	03:31
88	03:57	04:01
93.1	04:25	04:28
95.9	04:44	04:49
96.6	04:56	04:59
100	05:12	05:15

Tabla 13: Resultado de la prueba de agua hirviendo utilizando gas butano

T°	Primera prueba	Segunda prueba
26	00:00	00:00
45	00:44	00:48
62	01:18	01:15
70	01:31	01:33
82	02:01	02:10
85	02:08	02:19
88	02:19	02:30

93.1	02:37	02:45
95.9	02:57	03:08
96.6	03:05	03:17
100	03:18	03:27

El día que se realizó la prueba, la temperatura ambiente se encontraba en 29.6 °C y la temperatura del agua que se utilizó era de 26 °C.

La estufa con la que se evaluó el biogás se trató de colocar cerca de la estufa que se evaluó el gas butano, y la olla se enfriaba entre una prueba y otra.

Tomando en cuenta lo que afirma Lozano Rivas (2011), que no es recomendable trabajar con experimentos con un número de repeticiones menores a tres. Fue considerado hacer el cálculo del coeficiente de variación y así evaluar la variabilidad de los datos y poder hacer una justificación de las pocas repeticiones realizadas en este experimento. El cálculo se hizo utilizando Microsoft Excel.

El coeficiente de variación se calculó según el tipo de gas trabajado, la media de tiempo al alcanzar los 100 °C para el biogás dio como resultado 5:14 min y para el gas butano la media calculada fue de 3:23 min. Posteriormente se calculó la desviación estándar para cada caso y los resultados fueron de 0.000025 para la prueba con biogás y 0.0001 para la prueba con gas butano.

Una vez obtenidos los valores de la media y la desviación estándar se calculó el coeficiente de variación, mediante la división de la desviación estándar entre la media. Como resultado se obtuvieron valores de coeficiente de variación de 0.7% para el biogás y 3.1% para el gas butano.

Analizando los coeficientes de variación, Andrade Mendonça (2012) cita una clasificación en relación a la precisión experimental, tomando en cuenta los valores de coeficientes de variación, en dicha clasificación se establece que cuando el coeficiente de variación tiene valores menor o igual a 10% la precisión

experimental se considera optima. En base a esta calificación se considera como optima la precisión del experimento de la medición del tiempo de transferencia de calor.

Se consideró los resultados obtenidos como un parámetro de referencia, para poder estimar en cuanto tiempo se llevaría al punto de ebullición (100 °C) 1000 mL de agua para cada uno de los gases (biogás y butano). Para hacer esta estimación se hizo uso de una regla de tres, tomando en cuenta las medias del tiempo final.

El cálculo para ambos gases fue:

- ✓ Biogás: 200 mL en 5 min. y 14 seg. ó 314 seg.
- ✓ Gas Butano: 200 mL en 3 min y 23 seg. ó 203 seg.

Regla de 3 para biogás

$$\frac{200 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = \frac{314 \text{ seg.}}{x} \quad X = \frac{(1000 \text{ ml} * 314 \text{ seg.})}{200 \text{ ml}} \quad X = 1570 \text{ seg.} = 26.16 \text{ min}$$

Regla de 3 para gas butano

$$\frac{200 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = \frac{203 \text{ seg.}}{x} \quad X = \frac{(1000 \text{ ml} * 203 \text{ seg.})}{200 \text{ ml}} \quad X = 1015 \text{ seg.} = 16.91 \text{ min}$$

De estos datos se puede decir que el gas butano tiene menor tiempo de transferencia de calor que el biogás ya que se necesitarían 16.91 min para llevar a los 100 °C, en cambio con biogás se necesitarían 26.16 min para llevar al punto de ebullición 1000 mL de agua.

Estos datos pueden ser comparados con los de Amador Gutiérrez, Morazán Castillo, & Rugama Rivera, 2012, los que obtuvieron que utilizando briquetas de cascarilla de café, 1000 mL de agua tardan 20 min en llegar a los 100 °C, y la leña 27 minutos.

Esto puede observarse en la figura 30, donde se evidencia claramente que el gas butano alcanza la temperatura de ebullición del agua en menor tiempo.

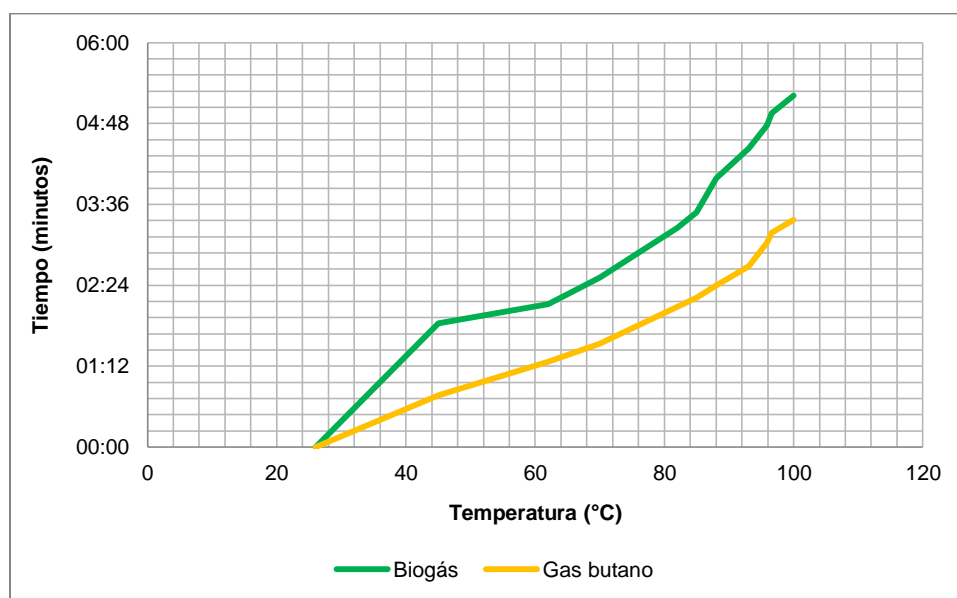


Figura 30: Promedio de los tiempos y las temperaturas alcanzadas para el biogás y el gas butano

Cabe destacar que para llevar al punto de ebullición los 200 mL, se utilizó el volumen de gas que se encontraba en el neumático, aproximadamente 31.1 L, con este valor se puede estimar cuanto de biogás puede utilizarse para hervir 1 litro (1000 mL) de agua, que haciendo una regla de tres el resultado de la cantidad de biogás para llevar 1000 mL a los 100 °C es de 155.6 L de biogás, que haciendo una comparación a la estimación que presenta Varnero Moreno (2011) de que 120000 L de biogás equivalen a 115.2 L de gas licuado.

Por lo tanto 155.6 L de biogás equivalen a 0.1494 L de gas licuado, y considerando que el cilindro de gas licuado de 25 lbs contiene aproximadamente 22.64 L de gas.

8.4 Determinación del presupuesto parcial de la producción de biogás con suero lácteo.

La comparación de la producción de biogás utilizando agua (base) y la producción de biogás utilizando suero lácteo (alternativa), se tomó en cuenta las medias de producción de los tratamientos con porcentajes de 20% con suero y con agua, obtenidos en el experimento de la determinación de la mezcla con mayor rendimiento de producción de gas. Es importante considerar que según Varnero Moreno (2011) el tiempo en producir gas en biodigestores semicontinuos es de 30 días para regiones con clima tropical con zonas planas como América Central, Venezuela, Indonesia.

Para el analisis presupuestario parcial, se ha tomado como referencia biodigestores con capacidad de mezcla igual a los 1000 L. Para hacer la estimación de la cantidad de biogás generado por los biodigestores según el disolvente, se hicieron reglas de tres y el resultado se presenta en la tabla 13. Para calcular la cantidad de mezcla diaria, se dividió el volumen del biodigestor entre el tiempo que tarda en producir biogás; 19 dias con suero y 30 para el agua.

Tabla 14: Estimación de carga diaria y producción de biogás en un biodigestor con capacidad de 1000 L

	Carga de mezcla (L/día)	Producción de biogás (L/día)
Biogistestor con Agua	33.33	2.47
Biodigestor con Suero	52.63	8.11

Con los resultados anteriores, se calcularon los costos de producción que se presentan en las tablas 15 y 16. Para la conversión de córdobas (C\$) a dolares (\$) se consultó el tipo de cambio de C\$ 26.2627, presentado por el Banco Central de Nicaragua el 27 de septiembre 2014.

Tabla 15: Costos de producción de biogás con agua por día

	Precio \$	Cantidad	Total \$
Agua (L)	0.00038	19	0.01
Excreta (kg)	0	14.33	0
Mano de obra	0.28	1	0.28
TOTAL			0.29

Tomando en cuenta que en las zonas rurales los 1000 L de agua tienen un costo de \$ 0.38 y que la persona que se encarga de recolectar (agua y excretas), hacer la mezcla de materiales y alimentación del biodigestor, llevando a cabo estas actividades en aproximadamente 30 minutos, y considerando que por hora de trabajo se le paga \$0.57, este valor se calculó tomando en cuenta el salario mínimo en el sector agropecuario que según el acuerdo ministerial ALTB – 01-03-2014 es de C\$ 2850.78 equivalentes a \$ 108.55. Además de lo anterior se considera un valor de \$ 0.00 a las excretas suponiendo que se existe disposición de estas.

Tabla 16: Costos de producción de biogás con suero por día

	Precio \$	Cantidad	Total \$
Suero (L)	0.005	30	0.17
Excreta (kg)	0	22.63	0
Cal diaria (lb)	0.017	1.74	0.029
Mano de obra	0.28	1	0.28
TOTAL			0.48

Partiendo de que un barril de capacidad de 200 L es vendido comúnmente a \$ 1.14, se hizo el cálculo del costo por litro y para el costo de la mano de obra, se realizó el mismo cálculo que usando agua, descrito anteriormente. Además se ha considerado que se agrega el 1.5% de cal a la mezcla diaria para neutralizar el pH, considerando el costo de la libra de cal en \$0.017.

Una vez calculados los costos de producción, se determinó el precio por litro de mezcla, dividiendo el costo de producción entre la cantidad de mezcla por día. El

resultado para la mezcla con agua es de \$ 0.0087 y \$ 0.0092 para la mezcla con suero.

El rendimiento de la producción de biogás, se calculó mediante reglas de tres, siempre tomando como referencia las medias de producción de gas con las formulaciones de 20% de suero y las de agua. Considerando que en 20 días la producción media de gas con las formulaciones al 20% de sólidos totales de suero fue de 30.99 mL = 0.03099 L y 14.99 mL = 0.01499 L para las mezcla con agua.

Obteniendo como resultado el biogás que se produce por cada litro de mezcla de excreta con agua es de 0.07 L y 0.15 L de biogás por cada litro de mezcla de excreta con suero.

Según Varnero Moreno (2011), 120000 L de biogás equivalen a 115.2 L de gas licuado, tomando esto como punto de partida y teniendo en cuenta que el precio por litro de gas licuado distribuido por la empresa tropigas cuesta \$0.59, se calculó el precio aproximado por litro de biogás.

Con el resultado de todos los cálculos presentados anteriormente se procedió a realizar el presupuesto parcial por mes, que se presenta en la tabla 17.

Tabla 17: Presupuesto parcial de la producción de biogás con suero lácteo al mes

	Agua (Base)	Suero (Alternativa)	Cambio
Carga diaria, L/mes (acumulado)	1000.00	1578.95	578.95
Precio de mezcla, \$/L	0.0087	0.0092	0.0005
Costo de mezcla total \$	8.70	14.49	5.80
Rendimiento (Producción de biogás, L)	2466.67	12797.78	10331.12
Precio de biogás \$/L	0.0014	0.0046	0.0032
Ingreso total	3.47	59.13	55.66

Ingreso Neto	-5.23	44.63	49.86
Tasa de retorno marginal			8.60

Los costos de mezcla total se calcularon haciendo una multiplicación de la carga diaria y el precio por litro de la mezcla, puede observarse que en el caso del suero el costo de mezcla total resulta ser \$ 5.80 mayor que el costo de la mezcla con agua, lo que hace referencia al costo marginal, lo que indica que cambiar el uso de agua por suero en la mezcla para producir biogás, aumentaría el costo en \$ 5.80.

En relación al rendimiento de la producción de biogás, se nota que en el caso del suero se produce 12797.78 L/mes, más de lo que se produce en un mes utilizando agua en la mezcla. Suponiendo que se vendiera el biogás se tendrían mejores ingresos utilizando suero en lugar de agua, puesto que el ingreso neto o beneficio marginal es la diferencia entre el ingreso total y el costo de mezcla total, y como resultado se obtuvo \$ 49.86 más utilizando suero en la mezcla por mes, esto indica que la utilización del suero provocaría un aumento en el ingreso o beneficio marginal nuevamente indicando que se vendiera el biogás producido.

Analizando la tasa de retorno marginal se puede observar que al utilizar suero el beneficio sería que por \$ 1 invertido se obtendrá \$ 8.60 más, lo que indica que la aplicación de esta tecnología es más rentable en relación a la tecnología base analizada(biogás producido con agua).

IX. CONCLUSIONES

Al finalizar esta investigación sobre la producción de biogás a partir de suero lácteo a escala de laboratorio se concluye lo siguiente:

- Se logró caracterizar la materia prima, teniendo como resultado para el suero una densidad para ambos tipos de 1022 gr/cm³, el pH medido para el suero dulce fue de 6.12 y para el suero ácido de 4.06, en tanto los grados Brix fueron de 5 para el suero dulce y 0 para el suero ácido. En relación a las excretas el porcentaje de sólidos totales fue de 47%, todo esto permitió la toma de decisiones y cálculos en las mezclas para la producción de biogás.
- Se determinó la mejor mezcla de suero y excreta de ganado bovino en cuanto a la producción de biogás, esto desde el punto de vista del porcentaje de sólidos totales, obteniendo que las mezclas al 20% de sólidos totales presentaron mejor producción de gas, siendo la mezcla con suero la que presento una media de producción de 30.99 mL a diferencia que la mezcla con agua que produjo 14.99 mL, 16 mL menos que la de suero.
- Fue posible generar biogás utilizando suero lácteo y excretas de ganado bovino, en una mezcla al 20% de sólidos totales, en biodigestores discontinuos a escala de laboratorio, siendo el gas combustible a partir de los 19 días, sin embargo los biodigestores tuvieron un tiempo total de producción de biogás de 31 días aproximadamente.
- Se evaluó el biogás producido mediante la medición del tiempo de transferencia de calor. Haciendo una comparación con gas butano, resultando este gas como el combustible que en menor tiempo llevó el agua a su punto de ebullición, siendo este tiempo de 3.23 minutos para 200 mL, en contraste al biogás que se tardó 5.14 minutos para 200 mL, sin embargo la producción de biogás con suero lácteo es una alternativa viable desde el punto de vista

medioambiental, porque se estaría aprovechando un residuo con un alto poder contaminante.

- Se realizó un análisis presupuestario parcial, en el que se consideró la producción de biogás con agua como base y como alternativa la generación de biogás con suero, teniendo como resultado un costo marginal de \$ 5.80, un beneficio marginal de \$ 49.86 y una tasa de retorno marginal de 8.60, reflejando que la alternativa es mucho más atractiva de la producción convencional de biogás.

X. RECOMENDACIONES

A analizar los resultados de la presente investigación se recomienda:

- Tener en cuenta las variaciones de pH que ocurren dentro de biodigestor, ya que esto afecta la producción de biogás significativamente. Para controlar estas variaciones se sugiere regular el pH con cal (óxido de calcio) a una concentración de 1.5%.
- Debe considerarse que para la producción de biogás, que el suero no contenga residuos de cloro o de otras sustancias químicas que destruya los microorganismos útiles para la biodigestión. En el caso de las excretas debe controlarse las fechas de desparasitación, ya que las excretas del ganado desparasitado afecta en gran manera las etapas de la biodigestión.
- Desarrollar otras pruebas con jeringas, pero esta vez cambiando las características con que se trabajó en esta investigación (el porcentaje de sólidos totales mayores al 20% y el periodo de evaluación).
- Realizar una cromatografía de gases para saber con mayor exactitud la concentración de metano que contiene el biogás generado con suero lácteo y así hacer comparaciones con el biogás producido convencionalmente.
- Efectuar una investigación para validar el efluente biofermentado de una biodigestión anaeróbica que se haya trabajado con suero lácteo.
- Desarrollar un estudio de caso, y así poder evaluar la incidencia económica y medioambiental que se tiene en el aprovechamiento del suero lácteo en la digestión anaeróbica.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Aguado, J. L. (2006). Tratamiento y reutilización del suero de leche . *Alimentatia México*, 27-30.
- Amador Gutiérrez, A. M., Morazán Castillo, F. J., & Rugama Rivera, J. A. (2012). *Validación de máquina briqueteadora de tornillo helicoidal para el aprovechamiento de la cascarilla de café como combustible*. Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Ingeniería Agroindustrial, Estelí.
- Comino, E., Rosso, M., & Riggio, V. (2009). *Development of a pilot scale anaerobic digester for biogas production from cow manure and whey mix*. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria del Territorio dell'Ambiente e delle Geotecnologie, Turin, Italia.
- Constantino , S., & Scheggia, N. (02 de Junio de 2010). *Universidad Nacional de Mar de Plata*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2014, de Universidad Nacional de Mar de Plata:
http://www.mdp.edu.ar/agrarias/grado/738_Economia_de_la_Producción/archivos/MD_10_Presupuestos.pdf
- Denicia, E. V., & Ramires Castillo, M. L. (2009). *La industria de la leche y la contaminacion del agua*. Mexico: Raymundo Sesma.
- FAO. (1998). *Ingeniería Económica Aplicada a la Industria Pesquera*. Recuperado el 18 de Noviembre de 2013, de
<http://www.fao.org/docrep/003/v8490s/v8490s00.htm#Contents>
- García Garibay, M., Revah M., S., & Gómez Ruíz, L. (2004). Productos lacteos. En *Biotecnología alimentaria* (pág. 197). México: Limusa.

Hilbert, J. A. (2010). *Manual para la producción de biogas*. Buenos Aires: Instituto de Ingeniería Rural - INTA - Castelar .

Horton, D. (1982). *Análisis de presupuesto parcial para investigación de papa a nivel de finca*. Boletín informativo, Centro Internacional de la papa, Lima.

Instituto Ecuatoriano de Normalización - INEN. (2012). NTE INEN 2609:2012/ Bebidas de sueros. Qutio, Ecuador.

Kavacik, B., & Topaloglu, B. (2008). *Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure*. Ondokuz Mayıs University, Department of Environmental Engineering, Samsun, Turquia.

Liao, P. H., & Lo, K. V. (1988). *Methane Production from Cheese Whey*. University of British Columbia, Department of Bio-Resource Engineering, Vancouver.

Magaña Ramirez , J. L., Rubrio, N. R., Jimenez Islas, H., & Matínez García, M. T. (2011). *Tratamiento anaerobio de desechos lácticos y estiércol de cabra*. Guanajuato.

Menchú, M. T., & Méndez, H. (2007). *Tabla de composición de alimentos de Centroamérica*. Guatemala: Instituto de nutrición de Centroamérica y Panamá.

Sosa Cáceres, R., Chao Espinoza, R., & Cruz Martínez, E. (Mayo de 2007). Boletín Técnico Porcino . *Biodigestories*. Cuba: Instituto de Investigaciones Porcinas.

Torres Guillén, D., & Arteaga Chávez, L. (7 de Septiembre de 2009). Desarrollo de un sistema de biodigestión y energías limpias. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Valencia Denicia, E., & Ramírez Castillo, M. L. (2009). La industria de la leche y la contaminación del agua. *Elementos*, 27 - 31.

Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogas*. Santiago de Chile: FAO.

Viquez Arias, J. A. (2012). Conversion de suero lácteo a biogás. *UTN Informa*, 41-45.

XII. ANEXOS

Anexo 1: Hoja de recogida de datos

Fecha: _____

Formulación: _____
hora: _____

No. Muestra	Volumen de gas
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	

Formulación: _____
Hora: _____

No. Muestra	Volumen de gas
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	

Formulación: _____
Hora: _____

No. Muestra	Volumen de gas
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	

Observaciones

Anexo 2: Análisis de regresión no lineal

*Modelo Volumen $b_0 + b_1 * \text{día} + b_2 * \text{día} * \text{día} + b_3 * \text{día} * \text{día} * \text{día}$*

% ST y Disolvente	Variable	N	CMEror	AIC	BIC	Interacción
10 Agua	Volumen	600	2.01	2128.70	2150.69	4

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
B0	-1E30	1E30	1.0E-03	9.28	0.28	32.80	<0.0001
B1	-1E30	1E30	1.0E-03	0.22	0.11	1.91	0.0570
B2	-1E30	1E30	1.0E-03	0.02	0.01	1.72	0.0856
B3	-1E30	1E30	1.0E-03	-8.7E-04	3.9E-04	-2.23	0.0261

Matriz de correlación de las estimaciones

	B0	B1	B2	B3
B0	1.00	-0.90	0.81	-0.73
B1	-0.90	1.00	-0.97	0.93
B2	0.81	-0.97	1.00	-0.99
B3	-0.73	0.93	-0.99	1.00

*Modelo Volumen $b_0 + b_1 * \text{día} + b_2 * \text{día} * \text{día} + b_3 * \text{día} * \text{día} * \text{día}$*

% ST y Disolvente	Variable	N	CMEror	AIC	BIC	Interacción
10_Suero	Volumen	600	8.50	2992.44	3014.42	4

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
B0	-1E30	1E30	9.28	12.66	0.58	21.78	<0.0001
B1	-1E30	1E30	0.22	0.24	0.23	1.02	0.3080
B2	-1E30	1E30	0.02	0.01	0.03	0.57	0.5709
B3	-1E30	1E30	-8.7E-04	-1.9E-04	8.0E-04	-0.23	0.8170

Matriz de correlación de las estimaciones

	B0	B1	B2	B3
B0	1.00	-0.90	0.81	-0.73
B1	-0.90	1.00	-0.97	0.93
B2	0.81	-0.97	1.00	-0.99
B3	-0.73	0.93	-0.99	1.00

*Modelo Volumen $b_0 + b_1 * \text{día} + b_2 * \text{día} * \text{día} + b_3 * \text{día} * \text{día} * \text{día}$*

% ST y Disolvente	Variable	N	CMError	AIC	BIC	Interacción
15_Agua	Volumen	600	1.72	2033.54	2055.52	5

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
B0	-1E30	1E30	12.66	10.17	0.26	38.88	<0.0001
B1	-1E30	1E30	0.24	-0.17	0.11	-1.62	0.1060
B2	-1E30	1E30	0.01	0.03	0.01	3.01	0.0028
B3	-1E30	1E30	-1.9E-04	-6.1E-04	3.6E-04	-1.68	0.0934

Matriz de correlación de las estimaciones

	B0	B1	B2	B3
B0	1.00	-0.90	0.81	-0.73
B1	-0.90	1.00	-0.97	0.93
B2	0.81	-0.97	1.00	-0.99
B3	-0.73	0.93	-0.99	1.00

*Modelo Volumen $b_0 + b_1 * \text{día} + b_2 * \text{día} * \text{día} + b_3 * \text{día} * \text{día} * \text{día}$*

% ST y Disolvente	Variable	N	CMError	AIC	BIC	Interacción
15_Suero	Volumen	600	6.36	2818.80	2840.79	4

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
-------------------	------------------	------------------	-----------------	-------------------	-------------	----------	----------------

B0	-1E30	1E30	10.17	13.76	0.50	27.36	<0.0001
B1	-1E30	1E30	-0.17	0.10	0.20	0.50	0.6174
B2	-1E30	1E30	0.03	0.03	0.02	1.19	0.2331
B3	-1E30	1E30	-6.1E-04	-1.2E-04	6.9E-04	-0.17	0.8625

Matriz de correlación de las estimaciones

	B0	B1	B2	B3
B0	1.00	-0.90	0.81	-0.73
B1	-0.90	1.00	-0.97	0.93
B2	0.81	-0.97	1.00	-0.99
B3	-0.73	0.93	-0.99	1.00

*Modelo Volumen $b_0 + b_1 * \text{día} + b_2 * \text{día} * \text{día} + b_3 * \text{día} * \text{día} * \text{día}$*

% ST y Disolvente	Variable	N	CMEror	AIC	BIC	Interacción
20_Agua	Volumen	600	13.35	3263.55	3285.54	6

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
B0	-1E30	1E30	13.76	10.58	0.73	14.52	<0.0001
B1	-1E30	1E30	0.10	-0.08	0.29	-0.27	0.7904
B2	-1E30	1E30	0.03	0.06	0.03	1.78	0.0763
B3	-1E30	1E30	-1.2E-04	-1.3E-03	1.0E-03	-1.32	0.1859

Matriz de correlación de las estimaciones

	B0	B1	B2	B3
B0	1.00	-0.90	0.81	-0.73
B1	-0.90	1.00	-0.97	0.93
B2	0.81	-0.97	1.00	-0.99
B3	-0.73	0.93	-0.99	1.00

*Modelo Volumen $b_0 + b_1 * \text{día} + b_2 * \text{día} * \text{día} + b_3 * \text{día} * \text{día} * \text{día}$*

% ST y Disolvente	Variable	N	CMError	AIC	BIC	Interacción
20_Agua	Volumen	600	13.35	3263.55	3285.54	6

Parámetros	Cota inf.	Cota sup.	Val.Ini.	Estimación	E.E.	T	p-valor
B0	-1E30	1E30	10.58	12.83	1.18	10.90	<0.0001
B1	-1E30	1E30	-0.08	-0.08	0.47	-0.17	0.8676
B2	-1E30	1E30	0.06	0.33	0.05	6.30	<0.0001
B3	-1E30	1E30	-1.3E-03	-0.01	1.6E-03	-7.78	<0.0001

Matriz de correlación de las estimaciones

	B0	B1	B2	B3
B0	1.00	-0.90	0.81	-0.73
B1	-0.90	1.00	-0.97	0.93
B2	0.81	-0.97	1.00	-0.99
B3	-0.73	0.93	-0.99	1.00

XIII. SIGLARIO

pH: Potencial de hidrogeno

ST: Sólidos totales

m³: Metros cúbicos

l: Litros

Kg: Kilogramos

%: Porcentaje

°C: Grados Celsius

T°: Temperatura

Hz: Herz

DQO: Demanda química de oxígeno

DBO: Demanda biológica de oxígeno

Cm: Centímetros

g: Gramo

mg/l: Miligramo por litro

Kcal: Kilocalorías

CH₄: Metano

H₂: Hidrogeno

CH₃COO⁻: Acetato

H₂/CO₂: Hidrogeno por dióxido de carbono

HDPE: Polietileno de alta densidad

PVC: Poli cloruró de vinilo

pulg: Pulgadas

CO₂: Dióxido de carbono

mL: Mililitros

g/cm³: Gramos sobre centímetros cúbicos

WBT: Water Boiling Test

Seg: Segundos

Min: Minutos